



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JARNO REPO  
BETONIRAKENTEIDEN ILMATIIVYDEN HALLINTA SISÄILMA-  
KORJAUKSISSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
taneuvoston kokouksessa 8. huhti-  
kuuta 2015

## TIIVISTELMÄ

**JARNO REPO:** Betonirakenteiden ilmatiiviyden hallinta sisäilmakorjauksissa  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 62 sivua, 7 liitesivua  
Maaliskuu 2016  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Rakennustuotanto  
Tarkastaja: professori Matti Pentti

**Avainsanat:** ilmatiiviys, sisäilma, betonirakenteet, korjaus

Käsitteenä ilmatiiviyden hallinta kertoo kompleksisesta kokonaisuudesta, joka määrittelemällä saavutetaan riittävä sisäilman laadun taso terveellisestä ja toiminnallisesta näkökulmasta.

Diplomityön taustana on ollut tarve ohjeistaa betonirakenteiden ilmatiiviyden parantamiseen liittyviä sisäilmakorjauksia. Tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää ilman virtaaman laskentaesimerkeillä betonin rakenneliittymien kautta liikkuvien ilmavirtausten ja epäpuhtauspitoisuuksien suuruusluokka. Lisäksi tavoitteena on ollut arvioida betonirakenteiden ilmatiiviyden parantamisen vaikutuksia sisäilman laatuun. Esimerkkinä käytettiin mikrobipitoisuutta. Betonirakenteiden ilmatiiviyden parantamiseen liittyville sisäilmakorjauksille on ollut tavoitteena esittää eriasteiset korjaustasot sisäilmaongelman tyypin, vakavuuden ja laajuuden mukaan.

Diplomityön laskentamallissa on esitetty betonirakenteiden rakojen merkitys ilmavuotoihin, ilmanvaihdon ja painesuhteiden merkitys, sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen ja ilmatiiviyden parantamisen vaikutuksia sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Tuloksina on esitetty, että jopa osittaisillakin parannustoimilla saadaan rajoitettua sisäilman epäpuhtauspitoisuuksia oikeissa sisäympäristön olosuhteissa. Työn tulosten ja johtopäätösten perusteella laadittiin esitys korjaustasojen määrittämisohjeeksi, jossa esitetään eriasteiset korjaustasot sisäilmaongelman laajuuden mukaan.

Tutkimuksen johtopäätöksenä voidaan todeta, että rakenteiden riittävällä ilmatiiviydellä sekä sisäympäristön hallituilla painesuhteilla voidaan merkittävästi vaikuttaa sisäilman laatuun hallitsemattomia ilmavuotoja estämällä ja rajoittamalla.

## ABSTRACT

**JARNO REPO:** Controlling the Airtightness of Concrete Structures in Indoor Air Quality Improving Renovations

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 62 pages, 7 Appendix pages

March 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Construction Management

Examiner: Professor Matti Pentti

**Keywords:** air tightness, indoor air quality, concrete structures, renovation

The concept of airtightness management encompasses a complex entity, which is achieved by defining an adequate level of indoor air quality from a healthy and functional point of view.

The background of this master's thesis has been the need to instruct concrete structures repair measures for air tightness improving renovations. The aim of this study was to investigate the magnitude of air currents and the movement of microbiological contaminants through the concrete structures joints by using an air flow calculation model and exemplifying calculations. In addition, the aim has been to assess the impact of improvements in the air tightness of concrete structures on indoor air quality. Moreover, the study aimed at formulating different classes for air tightness improving renovations according to the type, severity and extent of the indoor air problem in the starting situation.

The calculation model built in this master's thesis is used to demonstrate the air leakage enabled by concrete structures joints, the significance of ventilation and pressure ratio and the effect of structural air tightness on indoor air contaminant concentrations. The results suggest that even partial improvement of air tightness can be sufficient for controlling the contaminant concentration in otherwise well balanced indoor environmental conditions. Proposal for a guide is presented for the definition of the sufficient renovation classes for concrete structures air tightness improving renovations.

As a conclusion, it can be stated that the quality of indoor environment can be significantly contributed to by ensuring sufficient structural air tightness as well as achieving a control over the indoor environment pressure ratio. This effect is mediated by the control, or prevention of uncontrolled structural air leakages.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Vahanen Rakennusfysiikka Oy:ssä havaitun tutkimustarpeen johdosta.

Kiitän professori Matti Penttiä työni tarkastamisesta, diplomi-insinööri Katariina Lainetta työni ohjaamisesta ja yleisesti diplomityön ohjausryhmää osallistumisesta, ajatuksista ja neuvoista. Diplomityön ohjausryhmään ovat kuuluneet:

Heikki Immonen	Ardex Oy
Juha Tamminen	Betton Oy
Jukka Niemelä	Laattapiste Oy
Katariina Laine	Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Matti Raatikainen	TKR-Marketing Oy
Max Lauren	Saint-Gobain Weber Oy Ab
Sami Niemi	Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Sari Hildén	Helsingin kaupunki
Timo Rautanen	Saint-Gobain Weber Oy Ab
Ulla Lignell	Vantaan kaupunki

Erityisesti haluan kiittää työkavereitani Vahanen-yhtiöissä sekä perhettäni ja läheisiäni kaikesta siitä tuesta ja kannustuksesta tämän projektin loppuun saattamisessa.

Tampereella, 28.3.2016

Jarno Repo

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tausta .....	1
1.2	Tavoitteet.....	2
1.3	Työn suoritus.....	2
1.4	Työn rajaukset .....	2
2.	LÄHTÖKOHDAT .....	4
2.1	Sisäympäristön olosuhteet.....	4
2.2	Rakennuksen painesuhteet .....	4
2.3	Paine-eron mittauksesta rakennuksissa .....	6
2.4	Mikrobiologiset epäpuhtaudet.....	9
2.4.1	Yleistä mikrobeista .....	9
2.4.2	Sieni-itiöpitoisuuksien tutkiminen .....	12
2.4.3	Rakennusten terveydelliset olosuhteet ja sieni-itiöpitoisuuksien viitearvot.....	14
2.4.4	Mikrobien kasvuedellytykset betonirakenteissa .....	15
2.4.5	Epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan betonirakenteissa .....	17
2.4.6	Maa-aineksen ilmanläpäisevyyden merkitys maanvastaisissa rakenteissa .....	19
2.5	Betonirakenteiden ilmatiiviys .....	22
2.5.1	Yleistä .....	22
2.5.2	Ilmatiiviyden toteutus betonirakenteissa.....	22
2.5.3	Esimerkkejä ilmatiiviyden parantamiseen käytettävistä materiaaleista.....	23
2.5.4	Betonin kuivumiskutistuman vaikutus.....	24
2.6	Betonirakenteiden ilmatiiviyteen liittyvät tutkimusmenetelmät .....	25
2.6.1	Rakennuksen ilmanvuotoluvun määrittäminen .....	25
2.6.2	Lämpökuvaus .....	25
2.6.3	Merkkisavu.....	26
2.6.4	Merkkiainetekniikka .....	26
2.7	Betonirakenteiden ilmatiiviyteen liittyvien korjausten nykytila .....	27
2.8	Rakennusten elinkaari ja betonirakenteiden tekninen käyttöikä .....	28
3.	BETONIRAKENTEIDEN LIITTYMIEN EPÄPUHTAUSVIRTAUSTEN LASKENTAMALLI.....	31
3.1	Yleistä.....	31
3.2	Laskentamallin lähtöarvot .....	31
3.2.1	Tilan mitoitusarvot.....	31
3.2.2	Alapohjarakenteen mitoitusarvot .....	32
3.2.3	Ilmanvaihdon ja rakennuksen painesuhteiden oletusarvot.....	33

3.2.4	Ilman mukana liikkuvien sieni-itiöpitoisuuksien raja-arvot laskennassa .....	34
3.3	Laskentamalli ja -kaavat.....	34
3.3.1	Raon pinta-ala .....	34
3.3.2	Ilman tilavuusvirta raossa .....	35
3.3.3	Ilmavirtauksen tyyppi .....	35
3.3.4	Sekoitusyhtälö ja epäpuhtaustuotto.....	35
3.3.5	Ilmanvaihdon vaikutus .....	36
3.3.6	Ilmavuotoluvun mukainen vuotoilmavirta.....	37
3.3.7	Ilman tilavuusvirran arvioiminen maa-aineksissa.....	37
3.4	Laskentamallin tulokset.....	38
3.4.1	Ilman tilavuusvirran maksimi-arvoja mallirakenteilla .....	38
3.4.2	Rakenteen paksuuden ja raon ilmanvastuksen vaikutus raon läpi virtaavaan ilmamäärään.....	40
3.4.3	Ilmanvaihdon vuotoilmantarpeen merkitys painesuhteisiin ja rakenteiden ilmatiiviiden parantamiseen.....	41
3.4.4	Ilmanvaihdon toiminnan vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin .....	42
3.4.5	Epätiiviiden korjausten vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin eri paine-eroissa.....	45
3.4.6	Laskentaesimerkit ilman tilavuusvirran arvioimisesta maa-aineksissa.....	48
3.5	Tulosten tarkastelu .....	50
4.	YHTEENVETO .....	53
	LÄHTEET .....	58

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

DG18	Kasvatusalusta, dikloran-glyseroli-18-agar
MEA	Kasvatusalusta, 2 % mallasuuteagar
pmy	pesäkkeen muodostava yksikkö

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Depositio	Depositioilla tarkoitetaan hiukkasen poistumista ilmas- ta tarttumalla johonkin pintaan.
Diffuusio	Diffuusiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa kaasuseoksessa olevan yksittäisen kaasun pitoisuuserot tai osa-paine- erot pyrkivät tasoittumaan kaasumolekyylien liikkeen avulla. Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pi- toisuudesta alemmaa pitoisuutta kohti.
Emissio	Emissiolla tarkoitetaan haihtumista, jossa materiaalis- ta vapautuu kaasumaisia epäpuhtauksia ympäröivään ilmaan.
Ilmanpitävyys	Ilmanpitävyys tarkoittaa tässä yhteydessä rakennus- vaipan ilmanpitävyyttä, jota mitataan ja arvioidaan selvittämällä, kuinka paljon ilmaa liikkuu hallitsemat- tomasti ulkovaipan yli.
Ilmansulku	Ilmansulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtä- vänä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi.
Ilmanvaihto	Ilmanvaihdolla tarkoitetaan sisäilman vaihtamista likaisemmasta ilmasta puhtaampaan ilmaan paino- voimaisella tai koneellisella ilmanvaihtojärjestelmällä.
Kapillaarisuus	Kapillaarisuudella ja kapillaarisella kosteudella tar- koitetaan kosteuden siirtymisen mahdollistavaa omi- naisuutta, jolla huokoinen aine pystyy imemään nes- tettä nesteen pinnan yläpuolelle ja sitomaan sen sinne.
Karbonatisoituminen	Karbonatisoitumisella tarkoitetaan ilman hiilidioksi- din kulkeutumista betoniin aiheuttaen betonissa ole- van huokosveden emäksisyyden alenemisen, joka voi mahdollistaa betonissa olevien terästen korroosion so- pivissa olosuhteissa.
Konsentraatio	Konsentraatiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä ilmassa olevien epäpuhtauksien lukumäärää (pmy) ilman tila- vuusyksikköä (m <sup>3</sup> ) kohti.
Konvektio	Konvektiolla tarkoitetaan kaasun tai nesteen liikku- mista lämpötilaeron aiheuttaman tiheyseron vaikutuk- sesta.
Kosteusvaurio	Kosteusvaurioilla tarkoitetaan materiaaliin tai raken- teeseen kohdistuvaa liiallista kosteusrasitusta, jossa materiaalin tai rakenteen toimivuus on heikentynyt si- ten, että korjauksen tai uusimisen toimenpideraja ylit- tyy.
Muodonmuutos	Muodonmuutoksella tarkoitetaan materiaalin dimen- sioissa tapahtuvaa muutosta lämpötila- ja kosteusolo- suhteiden muuttuessa.
Mikrobi	Mikrobilla tarkoitetaan mikroskooppisia organismeja, joita ei voi havaita paljain silmin. Mikrobeja ovat muun muassa virukset, bakteerit ja homesienet.
Mikrobikasvusto	Mikrobikasvustolla tarkoitetaan tässä yhteydessä ra- kennuksessa rakenteissa tai sisäpinnoilla kasvavaa



	home- tai bakteerikasvustoa, joka voidaan havaita silmin tai joka on varmennettu mikrobiologisen analyysin avulla.
Resuspensio	Resuspensiolla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa pinnoilla olevien hiukkasten siirtymistä takaisin ilmaan.
Sieni-itiöpitoisuus	Sieni-itiöpitoisuudella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa elinkykyisten home- ja hiivasienten kokonaispitoisuutta ilmassa ( $\text{pmy}/\text{m}^3$ ).
Suhteellinen kosteus (%RH)	Suhteellisella kosteudella (%RH) tarkoitetaan kaasussa tai materiaalien huokosissa tietyssä lämpötilassa olevaa vesimäärän suhdetta kyseisen kaasun tai huokosten maksimaaliseen vesimäärään samassa lämpötilassa.
Virtaus ilmassa	Virtaus ilmassa luokitellaan laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen. Laminaarisessa virtauksessa virtaavan ilman hiukkaset etenevät tasaisissa rinnakkaisissa kerroksissa. Kerrokset voivat liukua toistensa ohi eri nopeuksilla, mutta ne eivät sekoitu keskenään. Sen sijaan turbulentissa virtauksessa kerrokset sekoittuvat keskenään esimerkiksi virtausnopeuden ja virtausreitillä olevien esteiden vaikutuksesta.
Vuotoilma	Vuotoilmalla tarkoitetaan rakenteen tai rakennuksen ulkovaipan epätiiviyydestä ja paine-eron vaikutuksesta aiheutuvaa hallitsematonta ilmapirtausta.

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Terminä ilmatiiviyden hallinta tarkoittaa kokonaisuutta, jossa huomioidaan rakenteiden ilmatiivystason, rakennukseen vaikuttavien painesuhteiden sekä talotekniikan toiminnan yhteisvaikutus, joihin liittyy olennaisesti myös rakennuksen terveellisyys ja viihtyisyys. Kokonaisuutena ilmatiiviyden hallintaa ei siis voi tarkastella pelkästään yhden tieteenalan näkökulmasta.

Rakenteiden ja erityisesti rakenneliittymien hyvällä ilmatiiviydellä on useita positiivisia vaikutuksia muun muassa rakennusten energiatehokkuuteen, sisäilman laatuun sekä rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Rakenteiden ilmatiiviyys on huomioitu ja sitä on edellytetty rakennusmääräyskokoelman eri osissa jo 1970-luvulta lähtien [1]. Kuitenkaan toteutus tai ohjeistukset eivät ole vastanneet määräyksissä edellytettyä ilmatiiviyden tasoa 30–40 vuotta sitten tai useissa tapauksissa vielä viime vuosinakaan.

Usein asennustyön heikolla laadulla saadaan vähennettyä tehdyn asennuksen sisäilman laatua parantavaa vaikutusta sekä pitkäaikaiskestävyyttä. Korjausrakentamisessa asennusten epäonnistumisesta keskustellaan yleisesti, mutta vähemmän arvioitu asia kuitenkin on voiko ns. epäonnistunut korjaus kuitenkin parantaa sisäilman laatua jopa riittävästi. Rakennuksissa sisäilman laatuun vaikuttaviin ilmapuotoihin ei kuitenkaan voida vaikuttaa pelkästään rakenteiden ilmanpitävyyttä parantamalla, koska koko rakennuksen ulkovaipan absoluuttista tiiviyttä ei voida käytännössä toteuttaa. Rakenteiden yli muodostuvat paine-erot, rakennuksen ilmanvaihtotapa sekä vuotoilmareittien koot ja sijainnit luovat sen lähtöasetelman, minkä suuruisia ilmavirtauksia ja niiden mukana mahdollisesti kulkeutuvia epäpuhtauspitoisuuksia sisäilmaan siirtyy.

Nykyään rakenteiden ilmatiiviyteen on alettu yleisesti kiinnittämään enemmän huomiota uudisrakentamisessa rakennusten kiristyneiden energiatehokkuusvaatimusten sekä uusissa rakennuksissa vaadittavien ilmatiiviydmittausten vuoksi. Rakennusten yleinen ilmatiiviyys on parantunut rakennusmääräysten ja rakentamisen ohjeistuksen tarkentumissa, mutta edelleen rakennustuotannon ilmatiiviyden taso vaihtelee erinäisistä syistä, kuten rakennustyön vaihtelevasta laadusta johtuen. Ilmatiiviyden merkitys rakentamisessa aletaan siis hiljalleen käsittää, mutta kuitenkin vielä yleisesti vähemmän tunnettu osa-alue on rakennusten ilmatiiviyden tason sekä ilmanvaihdon toiminnan yhteisvaikutus sisäilmaan kulkeutuviin epäpuhtauksiin.

## 1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää ilman virtaamaan kohdistuvilla laskenta-esimerkeillä betonin rakenneliittymien kautta liikkuvien ilmavirtausten ja mikrobipitoisuuksien suuruusluokkaa tietyillä oletusarvoilla. Lisäksi tavoitteena on ollut arvioida betonirakenteiden ilmatiiviyden parantamisen vaikutuksia sisäilman laatuun sekä esittää betonirakenteiden ilmatiiviyden parantamiseen liittyville sisäilmakorjauksille eriasteiset korjaustasot sisäilmaongelman tyypin, vakavuuden ja laajuuden mukaan sekä laatia ehdotus rakenteiden ilmatiiviyteen liittyvien korjaustasojen määritysohjeeksi.

Diplomityössä pyritään vastaamaan kysymyksiin, kuinka rakenteiden ilmatiiviyttä parantamalla rakennuksen elinkaari ja rakenteiden tekninen käyttöikä huomioiden voidaan saavuttaa riittävä sisäilman laadun taso epäpuhtauspitoisuutta vähentämällä, kuinka se voidaan toteuttaa eritasoisesti vaatimukset täyttäen ja mihin tilanteisiin rakenteiden ilmatiiviyden parantaminen soveltuu.

## 1.3 Työn suoritus

Tässä tutkimuksessa selvitettiin laskennallisesti betonirakenteiden epätiiviyiskohtien kautta liikkuvia ilmamääriä sekä niiden mukana mahdollisesti kulkeutuvia epäpuhtauspitoisuuksia eriarvoisien muuttujien ja raja-arvojen avulla Excel-taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen.

Laskentatulosten avulla arvioitiin rakenteiden ilmatiiviyttä parantavia korjauksia eri laatuilla ja asteilla korjausmenetelmillä sekä korjauksen ilmatiiviyden tason vaikutusta sisäilman laatuun sisäympäristön olosuhteet huomioiden.

Korjaustasojen arvioinnin jälkeen laadittiin eriasteisille korjauksille määritysohje, jonka tarkoituksena oli yhdenmukaistaa sekä yksinkertaistaa korjaustavan valintaa sisäilma-ongelmakohteissa.

## 1.4 Työn rajaukset

Tämän työn tutkimukseen sisältyviä rakenteita ovat betonisiin ulkovaipparakenteisiin kuuluvat betoniseinät sekä maanvastaiset alapohjarakenteet. Työssä keskitytään käsittelemään betonisen alapohjarakenteen ja betonisen ulkoseinärakenteen välisen rakenneliittymän kautta ilmavirtausten mukana kulkeutuvia epäpuhtauksia ja niiden pääsyn estämistä sisäilmaan. Epäpuhtauspitoisuuksien esimerkkinä käytetään mikrobiitiöpitoisuutta. Diffuusiolla kulkeutuvia epäpuhtauksia ei huomioida.

Epäpuhtausvirtauksien laskentaa varten betonirakenteiden väliset rakenneliittymät mallinnetaan homogeenisesti, jolloin ei oteta huomioon rakenteisiin tulevia epäyhtenäisyyksiä, kuten paikallisia poikkeavuuksia betonin kutistumassa tai rakenteessa. Lasken-

nassa ei ole huomioitu hiukkasten depositiota tai resuspensiota rakenteessa, ilmavuoto-reitissä tai sisätilassa.

Ilmatiiviyden hallintaan esitettyjen korjausmenetelmien soveltuvuudessa on pyritty huomioimaan riittävällä tarkkuudella rakenteiden käyttöikä, sisäilman laatutekijät, korjaukseen soveltuvat tuotteet ja korjauksilla estettävät tai rajoitettavat epäpuhtaudet.

## 2. LÄHTÖKOHDAT

### 2.1 Sisäympäristön olosuhteet

Sisäympäristön olosuhteilla eli sisäilmastolla tarkoitetaan yleisesti sisätilojen lämpö-, ääni- ja valaistusolosuhteita sekä sisäilman laatua. Hyvän sisäilmaston edellytyksenä on, että sisätilat eivät aiheuta terveydellistä tai muuta haittaa. Sisätilojen lämpötilan on oltava miellyttävä ja toimiva, tilojen on oltava vedottomia, valaistuksen on oltava riittävä, tiloissa ei saa esiintyä melua, eikä sisäilmassa saa olla merkittäviä epäpuhtauspitoisuuksia.

Sisäympäristön olosuhteiden kannalta rakenteiden ilmatiiviys ja ilmanpitävyys vaikuttavat pääasiassa sisätilojen lämpöolosuhteisiin sekä sisäilman laatuun. Rakenteiden epätiiviyshkohdat voivat heikentää sisätilojen lämpöolosuhteita ja aiheuttaa vedon tunnetta esimerkiksi ulkovaipparakenteen läpi sisäilmaan kulkeutuvien ilmavirtauksien vaikutuksesta.

Epätiiviyshkohtien kautta sisäilmaan voi kulkeutua myös melua ja hajuja muista tiloista. Rakenteiden heikko ilmatiiviys heikentää myös paloturvallisuutta mahdollistamalla savukaasujen leviämisen rakenteen läpi.

Rakenteiden ilmatiiviys vaikuttaa tietyissä sisäympäristön olosuhteissa myös rakennuksen kosteustekniseen toimintaan. Epätiiviyshkohdat voivat mahdollistaa lämpimään sisäilmaan sitoutuneen kosteuden siirtymisen sisäilmasta rakenteeseen päin konvektion avulla, jolloin sisäilman jäähtyessä rakenteeseen voi tiivistyä kosteutta. [2]

Terveydellisestä näkökulmasta merkittävä tekijä rakenteiden ilmatiiviyden tärkeyteen liittyen on rakenteiden epätiiviyshkohtien mahdollistamien terveydelle haitallisten epäpuhtauspitoisuuksien, kuten mikrobiologisten epäpuhtauksien, pääsy sisäilmaan [1]. Nykymääräyksissä ei esitetä raja-arvoja kaikille sisäilman epäpuhtauksille, vaan kirjallisuudessa esitetään viite- ja ohjearvoja, joita voidaan pitää tavanomaiselle sisäympäristölle poikkeavan kohonneina pitoisuuksina.

### 2.2 Rakennuksen painesuhteet

Rakennuksissa ilman virtaus tapahtuu luonnollisella tai pakotetulla konvektiolla. Luonnollisessa konvektiossa ilma liikkuu rakenteiden yli olevien ilman tiheyserojen vaikutuksesta. Ilmavirtauksen suunta on suuremmasta paineesta pienempään päin. Rakennuksissa ilmavirtauksiin voi vaikuttaa ns. pakotettu konvektio, jossa ilman liikkeeseen vaikuttaa tuuli, savupiippuvaikutus tai ilman liikettä tehostetaan keinotekoisesti. [2]

Tuulen aiheuttaman rakenteeseen kohdistuvan paineen määrä riippuu tuulen nopeudesta ja suunnasta sekä rakennuksen muodosta. Esimerkiksi seinärakenteissa tuuli aiheuttaa kohtaamaansa seinäpintaan ylipainetta ja sivuseinille sekä tuulensuojan puoleiselle seinälle alipaineen [2]. Tuuli voi luoda rakennukseen painevaihteluita, joiden kokoon vaikuttaa oleellisesti rakennuksen ulkovaipan ilmatiiviys.

Savupiippuvaikutukseksi kutsutaan ulko- ja sisäilman välisen lämpötilaeron aiheuttamaa paine-eroa. Paine-ero syntyy, kun lämmin ilma nousee ylöspäin ilman tiheyden laskiessa ja ilman muuttuessa kevyemmäksi kuin ympäröivä kylmempi ilma. Ulkoilmaa lämpimämmän rakennuksen sisäpuolella sisätilojen alaosiin muodostuu alipaine ja yläosiin ylipaine suhteessa ulkoilmaan [2]. Sisätilojen alaosien alipaineisuus mahdollistaa ilmavirtaukset alapohjan ja seinän alaosan epätiiviyskohdista sisäilmaan.

Rakennuksen luonnollisiin painesuhteisiin voidaan vaikuttaa keinotekoisesti ilmanvaihtojärjestelmillä. Ilmanvaihtojärjestelmät jaetaan yleisesti kolmeen eri luokkaan: painovoimaiseen ilmanvaihtoon, koneelliseen poistoilmanvaihtoon sekä koneelliseen tulo- ja poistoilmanvaihtoon. Painovoimainen ilmanvaihto perustuu savupiippuvaikutukseen, jossa ilma virtaa painovoimaisesti rakennuksen yläosissa sijaitseviin poistoilmakanaviin. Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä ilmavirtaus pakotetaan pois sisätiloista poistoilmakanavaan liitetyllä kanavapuhaltimella tai huippuimurilla ja korvausilma sisätiloihin tuodaan suoraan ulkoilmasta korvausilmaventtiileiden kautta. Koneellisessa tulo- ja poistoilmajärjestelmässä sisätilojen ilmanvaihto hoidetaan täysin koneellisesti. Ilmanvaihdon aiheuttamaan painesuhteiden muutokseen vaikuttavat rakennukseen tulevat ja rakennuksesta poistuvat ilmamäärät. Jos rakennuksesta poistetaan enemmän ilmaa kuin sinne saadaan tuotua, syntyy rakennukseen alipaine ulkoilmaan nähden. [2]

Paine pyrkii tasaantumaan suuremmasta paineesta pienempään päin. Tästä johtuen sisätilojen pakotettu tai luonnollinen alipaineisuus, eli ympäristöä pienempi paine, mahdollistaa ilmavirtausten siirtymisen ympäristöstä sisätiloihin. Ilmavirtausten siirtymiseen sisätiloihin vaikuttaa muodostuvan paine-eron lisäksi oleellisesti myös ilmavirtauksen mahdollistaman vuotoilmareitin muodostama ilmanvastus. Mitä pienempi vuotoilmareitin ilmanvastus on, sitä helpommin ilma virtaa vuotoilmareitistä läpi. Ilmanvastus pienenee, kun vuotoilmareitin pinta-ala kasvaa. Paine-ero pyrkii siis tasaantumaan sitä reititiä pitkin, missä ilma helpoimmin liikkuu.

Koska pakotetun konvektion aiheuttamat paine-erot pyrkivät tasaantumaan ilmavirtausten kannalta helpointa reittiä, voi paine-erojen tasaantuminen tapahtua osittain myös sisätilojen välillä. Esimerkkinä tilanteesta voidaan esittää ulkovaipparakenteiltaan tiivis alipaineinen sisätila, jonka tilan jakavat kevyet väliseinät ja täydentävät rakenteet ovat ilmanpitävyydeltään heikosti toteutettuja. Jos viereisissä tiloissa on heikosti ilmanpitäviä ulkovaipparakenteita tai läpivientejä, voi epätiiviyskohdan mahdollistama vuotoilma liikkua siirtoilmana rakennuksen sisällä tilasta toiseen, jos tilojen välillä on paine-eroa.

Tämän vuoksi rakennuksen painesuhteita tuleekin tarkastella kokonaisuutena huomioiden myös tilojen välillä liikkuvat ilmavirtaukset.

## 2.3 Paine-eron mittauksesta rakennuksissa

Rakennuksissa tapahtuvalla paine-eron mittauksella tarkoitetaan kahden vallitsevan ilmanpaineen erotuksen laskemista, esimerkiksi ulkoilman ja sisäilman ilmanpaineiden erotusta [3]. Mittaustulosten yksikkönä käytetään paineen SI-järjestelmän mukaista yksikköä Pascal (Pa). Paine-eromittausten tuloksissa käytetään termejä ylipaine ja alipaine. Ylipaineella tarkoitetaan mitattavan tilan tai rakenneosan korkeampaa ilmanpainetta suhteessa vertailtavaan ympäristön ilmanpaineeseen ja alipaineella matalampaa. Jos paine-eroa ei synny, ovat mitattavat ilmanpaineet tasapainossa.

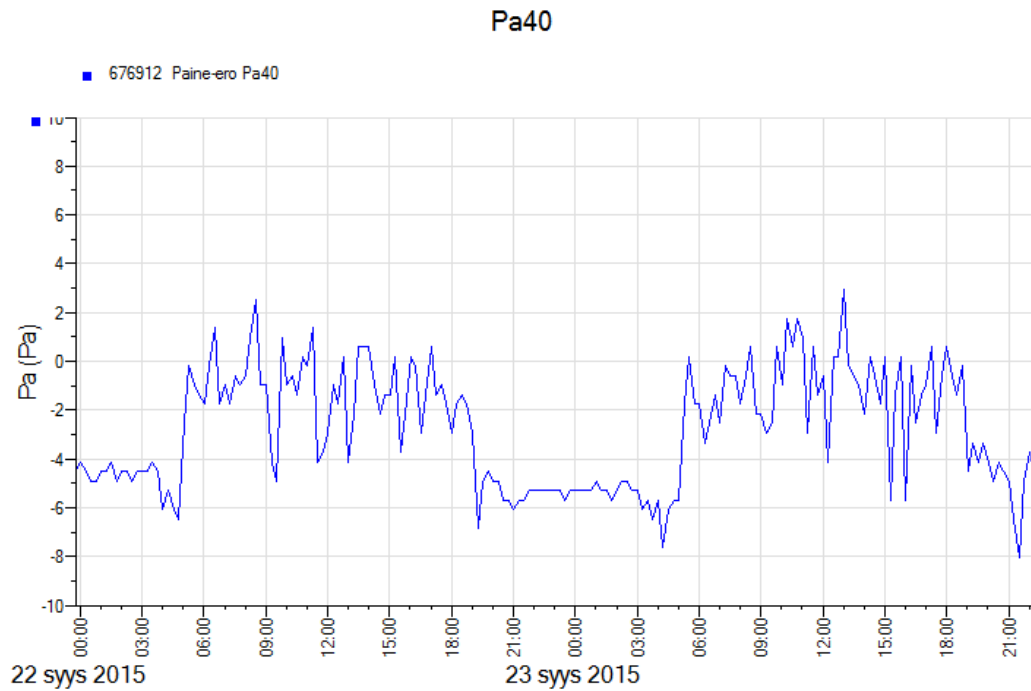
Paine-eroa mitataan hetkellisinä mittauksina tai jatkuvatoimisinä mittauksina ennalta asetetuin aikavälein tietyn ajanjakson ajan. Hetkellisiä mittauksia käytetään usein todentamaan painesuhteet jonkin muun tutkimuksen tukitoimenä tutkimushetkellä. Jatkuvat toimisia mittauksia käytetään rakennuksen painesuhteiden arviointiin muun muassa ilmanvaihdon ja ulkoilman olosuhteiden vaikutuksesta.

Usein paine-eromittauksissa selvitetään rakennuksen ulkovaipan yli vallitsevia paine-eroja. Mittausten avulla selvitetään rakenteiden läpi tai niiden liittymäkohdista kulkevien ilmavirtausten suunta. Mittaus toteutetaan usein ikkunan tai oven kautta. Mittaustavalla saadaan yleiskuva ulko- ja sisäilman välisistä painesuhteista, mutta menetelmä ei mahdollista yksittäisten rakenneosien ilmatiiviyspuutteiden vaikutusten arviointia rakennuksen sisäisten painesuhteiden muutosten sekä rakenteiden eriasteisten ilmanpitävyyksien johdosta. Mitattaessa paine-eroa ulkovaipan yli mittaukseen voi vaikuttaa esim. tuuli tai mittausta paikan sijainti. Tuuli voi muodostaa ajoittain yli- tai alipaineen mitattavaan pisteeseen ulkoilmassa aiheuttaen virheellisen tulokinnan rakennuksen yleisistä painesuhteista. Todellisuudessa esimerkiksi tutkittavan ulkoseinärakenteen eristetilän ja sisäilman välinen paine-ero voi poiketa näistä mittaustuloksista mittausjakson pituuden sekä rakenteen ulko- ja sisäkuoren ilmatiiviuden tason vaikutuksesta.

Vertailua rakennuksen ulkovaipan yli mitatuista sekä tutkittavan rakenneosan ja sisäilman välisistä paine-eroista on hyvin vähän. Hetkellisiä paine-eromittauksia tehdään usein rakennukseen liittyvien tutkimusten yhteydessä rakenteiden ja sisäilman välillä tai ulkovaipan yli, mutta jatkuvatoimisia mittauksia suoritetaan pääosin pelkästään rakennuksen ulkovaipan yli.

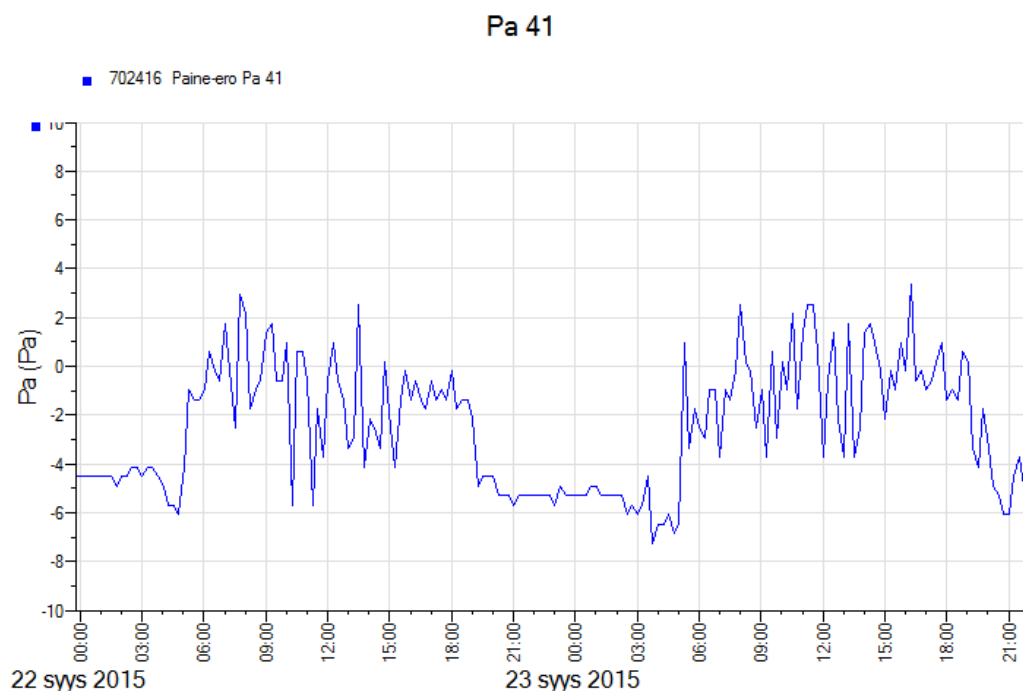
Vahanen Oy:n toteuttamissa diplomityöstä riippumattomissa esimerkinomaisissa rakennuksen painesuhdemittauksissa mitattiin ulkoilman ja sisäilman välisiä paine-eroja ja vertailtiin niitä sisäosistaan tiivistettyihin sandwich-elementtirakenteiden ulkoseinärakenteiden eristetilän ja sisäilman välisiin paine-eroihin. Mitattu rakennus on kolmikerroksinen ja rakennuksessa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Mit-

tauspaikka sijaitsi rakennuksen 1. kerroksessa sisäpihan puolella, jossa tuulen vaikutuksen on oletettu olevan pienin. Mittaukset suoritettiin 15 minuutin mittausvälillä mittausajan ollessa sama molemmissa mittauksissa. Mittausjakson pituus oli keskimäärin 2 viikkoa. Seuraavissa kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) on esitetty supistettu otanta mittaustuloksista mittausjaksojen ajalta noin 2 päivän osalta. Otanta vastaa tuloksiltaan koko mittausjakson keskimääräistä vuorokausivaihtelua, kun rakennuksen ilmanvaihto toimii normaalisti.



**Kuva 1.** Kuvaajassa on esitetty painesuhdemittauksen Pa 40 (ulkoilman ja sisäilman välinen paine-ero) tulokset 22.9–23.9.2015.





**Kuva 2.** Kuvaajassa on esitetty painesuhdemittauksen Pa 41 (sandwich-elementin eristetilän ja sisäilman välinen paine-ero) tulokset 22.9–23.9.2015.

Painesuhdemittauksessa Pa 40 (ulkoilman ja sisäilman välinen paine-ero) paine-ero vaihteli välillä  $-8 \text{ Pa} - +2,9 \text{ Pa}$ . Painesuhdemittauksessa Pa 41 (sandwich-elementin eristetilän ja sisäilman välinen paine-ero) paine-ero vaihteli välillä  $-7,3 \text{ Pa} - +3,3 \text{ Pa}$ .

Painesuhdemittausten Pa 40 ja Pa 41 samanaikaisten mittaustulosten tarkkoja lukuarvoja vertaillen havaittiin hajontaa mittaustulosten välillä. Mittaustulosten analysoinnissa painesuhdemittauksen Pa 40 tuloksista vähennettiin painesuhdemittauksen Pa 41 tulokset jokaisen mittaushetken osalta. Mittaustulosten keskinäinen poikkeavuus oli suurimmillaan  $-7,1 \text{ Pa} - +5,1 \text{ Pa}$ . Pääosassa mittauksista keskinäinen poikkeavuus oli noin  $-2 \text{ Pa} - +2 \text{ Pa}$ . Mittaustulosten keskinäisen poikkeavuuden perusteella voidaan arvioida, että ulkoilman ja sisäilman välisiin paine-eroihin vaikuttaa tuuli, vaikka mittauspisteen sijainti pyrittiin valitsemaan niin, että tuulen vaikutus on minimoitu. Useimmat paine-eromittalaitteiden valmistajat ilmoittavat rakennuksen mittauksissa olevilla mitta-alueilla mittalaitteiden tarkkuudeksi  $\pm 1 \%$  lukemasta (esim. Dwyer Magnesense ja Produal) ja osa lisäksi  $\pm 3 \text{ Pa}$  lukemasta (esim. Produal). Paine-eron mittaukseen liittyy mittalaitteen mittaustarkkuuden lisäksi myös mittausvirhe. Mittalaitteet on mahdollista asentaa väärin ja laitteeseen liitetyissä letkuissa voi olla puutteita tai vikoja. Laitteiden mittaustarkkuuksien, mahdollisten mittausvirheiden ja olosuhteiden muutosten kuten tuulen aiheuttamien painesuhdemittausten keskinäiset erot, jotka olivat esimerkiksi kikohteessa noin  $\pm 5 \text{ Pa}$ , voivat vaikuttaa mittausten luotettavuuteen ainakin hetkellisissä mittauksissa sekä mahdollistaa rakennuksen painesuhteiden virheellisen arvioinnin.

## 2.4 Mikrobiologiset epäpuhtaudet

### 2.4.1 Yleistä mikrobeista

Sisätiloissa esiintyvien mikrobien tavallisimpia lähteitä ovat ulkoilman ja tilojen käyttäjät. Ulkoilma on usein merkittävässä osassa mikrobien leviämisessä rakennuksiin, koska ulkona luonnollisesti esiintyvät mikrobit liikkuvat ulkoilman virtausten mukana. Ulkoilmasta sisäilmaan pääsevien mikrobien pitoisuus vaihtelee vuodenajoittain. Ulkoilman mikrobipitoisuudet ovat suurimmillaan loppukesällä ja syksyllä. Ihmiset altistuvat luonnollisesti mikrobeille sisä- ja ulkotiloissa. Rakennuksissa mikrobit saattavat aiheuttaa oireiluja henkilöissä, kun mikrobialtistus on jatkuvaa ja pitoisuudeltaan oireilun mahdollistavaa.

Kun mikrobeja esiintyy yleisesti luonnossa, on todennäköistä, että mikrobeja esiintyy tavanomaisessa tilanteessa pienehköinä määrinä myös rakennuksissa ja rakennusmateriaaleissa. Pysyvästi tai toistuvasti kostuvissa rakenteissa ja niiden pinnoilla kasvaa mikrobeja: homeita, hiivoja ja bakteereja. Rakennuksen rakenteissa tai rakennepinnoilla esiintyvän mikrobikasvuston syy on usein kosteusvaurion sekä sopivien lämpö- ja ravinto-olosuhteiden muodostama yhtälö. Pienikin mikrobimäärä voi kasvaa sopivissa olosuhteissa laajaksi ongelmaksi. Mikrobikasvustosta voi kulkeutua sisäilmaan ilmavirtausten mukana mikrobeja (esimerkiksi sieni-itiöitä, rihmaston kappaleita ja niiden osasia eli fragmentteja) sekä niiden hajoamis- ja aineenvaihduntatuotteita, joille sisätiloissa oleskelevat ihmiset altistuvat. Seuraavassa taulukossa (Taulukko 1) on esitetty esimerkkejä ulko- ja sisäilmassa yleisesti esiintyvistä sienisuvuista ja -ryhmistä sekä kosteusvaurioon viittaavista mikrobisuvuista [4].

**Taulukko 1.** Esimerkkejä ulko- ja sisäilmassa yleisesti esiintyvistä sienisuvuista ja –ryhmistä sekä kosteusvaurioon viittaavista mikrobisuvuista [4].

<b>TAULUKKO 4.</b> <b>ESIMERKKEJÄ ULKO- JA SISÄILMASSA YLEISESTI ESIINTYVISTÄ SIENISUVUISTA</b> <b>JA -RYHMISTÄ SEKÄ KOSTEUSVAURIOON VIITTAAVISTA MIKROBISUVUISTA,</b> <b>-LAJEISTA JA -RYHMISTÄ.</b>		
Ulkoilmassa yleisiä sienisukuja ja -ryhmiä	Sisäilmassa yleisiä sienisukuja ja -ryhmiä	Kosteusvaurioon viittaavia mikrobisukuja, -lajeja ja -ryhmiä
<i>Cladosporium</i> basidiomykeetit <i>Penicillium</i> <i>Aspergillus</i> <i>Alternaria</i> hiivat steriilit**	<i>Penicillium</i> <i>Aspergillus</i> <i>Cladosporium</i> hiivat	<i>Stachybotrys</i> * <i>Trichoderma</i> * <i>Aspergillus versicolor</i> * <i>Aspergillus fumigatus</i> * <i>Chaetomium</i> * <i>Phialophora</i> <i>Fusarium</i> * aktinomykeetit* pääosin Streptomyces
* mahdollisesti toksiineja tuottavia mikrobeja ** pesäkkeitä, jotka eivät käytettävillä kasvualustoilla muodosta itiöitä		

Sisäilmassa yleisesti esiintyviä sienisukuja ovat *Penicillium*, *Aspergillus* (vain tietyt lajit) ja *Cladosporium*. *Penicillium* ja *Aspergillus* – sukujen sieniä esiintyy yleisesti rakennuksissa ja sisäilmassa. *Cladosporium* – suvun sienet ovat ulkoilman yleisin sienisuku, minkä vuoksi kyseistä sukua havaitaan myös yleisesti sisäilmassa varsinkin kesäisin ja syksyisin. Kosteusvaurioituneissa rakenteissa esiintyy usein mikrobikasvua, joka voi heijastua myös sisäilman mikrobistoon. Kosteusvaurioindikaattoreina, eli kosteusvaurioiden mikrobikasvustoon viittaavia mikrobisukuja ja -lajeja, joita ei yleensä esiinny sisäilmassa, ovat muun muassa *Stachybotrys*, *Trichoderma*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus fumigatus*, *Chaetomium* ja *Fusarium*. [5]

*Stachybotrys* – suvun sienet ovat hidaskasvuisia ja ilmaantuvat vauriorakennukseen vasta pitkän ajan kuluessa. Rakennuksissa *Stachybotrysta* esiintyy usein tapetin tai kipsilevykartongin takapinnalla. *Trichoderma* – suvun lahottajasienet esiintyvät ja menestyvät pääosin kosteassa puutavarassa. *Aspergillus* – suvun sienet esiintyvät keraamisissa tuotteissa, maaleissa ja liimoissa. *Aspergillus fumigatus* viihtyy parhaiten korkean kosteuspitoisuuden omaavalla alustalla, kun taas *Aspergillus versicolor* menestyy myös kuivemmissä olosuhteissa. *Chaetomium* – suvun sienet kasvavat mm. maaperässä sekä rakennuksissa selluloosaa sisältävillä kasvualustoilla, kuten paperi- ja kartonkialustoilla. Vauriorakennuksissa näitä sieniä havaitaan vasta pitkäkestoisissa ja vakavissa kosteusvaurioissa ja niitä havaitaan yleensä *Aspergillus fumigatus* kasvuston yhteydessä. *Fusarium* – suvun sieniä esiintyy yleisimmin maatalousympäristössä viljassa ja heinissä sekä rakennuksissa rakennusmateriaaleissa, joissa on käytetty luonnonmateriaaleja, kuten olkea, turvetta tai kierrätysmateriaaleja. *Fusarium* – suvun sieniä ei pidetä tavanomaisena kosteusvaurioindikaattorina, jolloin yksittäistäkin pesäkehavaintoa voidaan pitää

poikkeavana, jos rakenteissa epäillään tai tiedetään olevan kosteusvaurio. Kosteusvaurioituneissa rakenteissa voi kasvaa myös sisäilmassa muutoinkin yleisesti esiintyviä sieniä, jolloin rakenteiden mikrobikasvusto voi kohottaa sisäilman sieni-itiöpitoisuuksia, vaikka sisäilman sienilajisto ei olisikaan tavanomaisesta poikkeava. [6]

Kosteusvaurioituneissa rakenteissa olevat sienikasvustot irrottavat itiöitä rihmastostaan eritasoisesti. Esimerkiksi Tuula Putuksen kirjoittamassa kirjassa [6] esitetään, että *Penicillium* itiöt irtoavat helposti rihmastosta ja leijuvat pienikokoisina pitkään ilmassa. *Penicillium* itiöi helpommin kuin esimerkiksi *Cladosporium* tai *Aspergillus versicolor*, puhumattakaan raskaammista liman peittämistä itiöistä, kuten *Stachybotrys* tai *Chaetomium*, joiden itiöt viipyvät ilmassa vain lyhyen ajan. Esimerkiksi *Penicillium* voi sopivissa olosuhteissa muodostaa näkyviä kasvustoja jo viikossa ja saattaa peittää alleen muita hidaskasvuisempia lajeja. Usein kosteusvauriorakennuksissa *Penicillium* esiintyykin valtalajina, koska se kestää hyvin myös kosteuden vaihtelua.

Homesieni-itiöiden koko vaihtelee yleisesti noin 2-50 µm välillä. Carlile *et al.* ovat julkaisemassaan oppikirjassa [7] havainnollistaneet sieni-itiöiden kokoja. Kirjassa esitetyt *Penicillium* ja *Aspergillus* sieni-itiöiden koot ovat keskimäärin 2-5 µm (mikrometriä) ja esim. *Cladosporium* sieni-itiöiden keskimäärin 5-15 µm. Mikrobikasvustosta irtoavia fragmentteja on esitetty havainnollistamalla Górnyn vuonna 2004 tekemässä tutkimuksessa [8], jossa *Penicillium* ja *Aspergillus* sieni-itiöiden fragmenttien koot ovat keskimäärin 0,2-2 µm. Górnyn tutkimuksessa esitetään myös muihin lähteisiin viitaten, että mikrobien partikkelikoot vaikuttavat niiden vaarallisuuteen ihmisen terveydelle. Górnyn mukaan alle 2,5 µm:n partikkelit on useissa tutkimuksissa todettu potentiaalisesti kaikkien haitallisimmiksi.

Rakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteet sekä niiden mahdollistama mikrobikasvusto voivat muuttua ajoittain. Rakenne voi ajoittain kuivua, jolloin myös rakenteen mikrobistossa voi tapahtua muutoksia. Myös mikrobisto itsessään voi vaikuttaa rakenteen olosuhteisiin. Näitä ilmiöitä on tutkittu mikrobisuksessiona. Leivon *et al.* Opas kosteusongelmiin -julkaisun [9] mukaan sukkessiolla tarkoitetaan mikrobiston muuttumista ympäristöolosuhteiden mukaan. Ilmiö voidaan havaita monissa ympäristöissä: esimerkiksi maaperässä tai rakennuksen kosteusvaurioituneessa osassa. Mikrobilajisto, joka aloittaa homehtumisen, on sellaista paikalla olevaa mikrobistoa, jolla on paras sopeutumiskyky vallitseviin olosuhteisiin. Vaikka ympäristöolot pysyisivätkin muuttumattomina, mikrobilajisto voi vaihtua, koska mikrobit muuttavat itse välitöntä ympäristöään tuottamalla aineenvaihdunnan sivutuotteina mm. lämpöä ja kosteutta. Julkaisun mukaan kosteusvauriorakennuksen sukkessiota tunnetaan huonosti, mutta voidaan kuitenkin perustellusti olettaa, että sukkessiota on ainakin kahta eri tyyppiä, joista toiselle on tyypillistä lisääntyvä ja toiselle vähenevä kosteus. Sukkession eri vaiheissa ilmaantuvista mikrobeista voidaan käyttää nimitystä primäärinen, sekundäärinen ja tertiäärinen lajisto. Näillä nimityksillä viitataan ainoastaan mikrobien ilmaantumisaikakohtaan: primäärinen mikrobisto tulee ensin, sitten sekundäärinen ja lopuksi tertiäärinen. Vähitellen kostu-

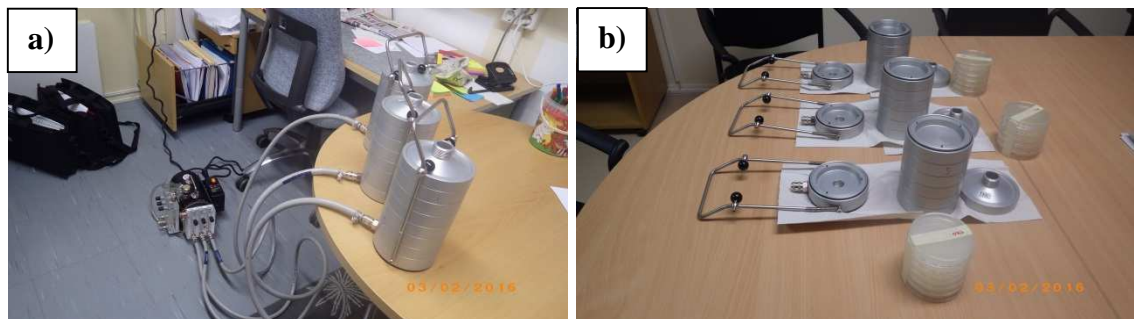
vaan rakenteeseen voidaan ajatella ensiksi ilmaantuvan ns. kuivassa viihtyvää lajistoa, esim. *Aspergillus versicolor*, joka vähitellen korvautuu kosteammassa oloissa viihtyvillä lajeilla, esim. *Aspergillus fumigatus*. Materiaalin kertakastuminen vaikkapa laitevuodon yhteydessä saattaa mahdollistaa hyvin kosteassa viihtyvien lajien, esim. *Stachybotrys atran*, ilmaantumisen ensimmäisten mikrobien joukossa. Rakenteen vähitellen kuivuesssa myös lajisto muuttuu vähemmän vettä tarvitseväksi. Julkaisussa esitetäänkin, että sukkessioilmiö on hyvä tuntee, koska sukkessiolla on suuri vaikutus siihen, mitä mikrobeja rakennuksesta eri aikoina eri paikoista otetuissa näytteissä löytyy.

## 2.4.2 Sieni-itiöpitoisuuksien tutkiminen

Rakennusten mikrobivaurio voidaan havaita jossain tapauksissa aistinvaraisesti. Kuitenkin aistinvaraisen arvioinnin subjektiivisuuden vuoksi toisinaan on tarpeen todentaa mikrobikasvusto laboratorioanalysein. Tulokset voivat toimia esimerkiksi korjaustarpeen tai terveyshaitan arvioinnin tukena. Rakennuksissa esiintyviä mikrobipitoisuuksia ja -lajistoa tutkitaan rakenteista pinta- ja materiaalinäytteillä sekä sisäilmasta ilmanäytteillä.

Tässä tutkimuksessa käsiteltäviä sieni-itiöpitoisuuksia tutkitaan ilmanäytteenottomenelmällä. Asumisterveysohjeen [4] mukaisesti sisäilman mikrobimittauksilla tutkitaan, ovatko rakennuksen sisäilman sieni-itiöpitoisuudet ja suvusto tavanomaisia sen sijaintiin, ikään ja vuodenaikaan nähden. Lisäksi asumisterveysohjeen mukaan sisäilman mikrobimittauksilla voidaan todeta, leviääkö muualla rakennuksessa, esimerkiksi porraskäytävässä tai kellaritulassa, esiintyvistä mikrobikasvustosta itiöitä tai mikrobisoluja rakennuksen muihin sisätiloihin.

Yleisin käytössä oleva sisäilman mikrobipitoisuuksien mittaamenetelmä perustuu im-paktorikeräimeen. Sisäilmamittauksissa hyväksyttyjä keräysmenetelmiä on useita erityyppisiä, mutta yleisin käytössä oleva keräintyyppi on ns. Andersen-keräin, eli 6-vaiheimpaktori, johon muun muassa asumisterveysohjeen mikrobipitoisuuksien viitearvot perustuvat. Andersen-keräin on esitetty seuraavissa kuvissa (Kuvat 3 a ja b).



**Kuvat 3 a ja b.** Kuvassa a on esitetty Andersen-keräimeen kuuluvat pumppu ja kolme tasolevysarjaa. Kuvassa b on esitetty tasolevysarjat osittain avattuna sekä tasolevyjen sisään laitettavat maljasarjat. Lähde: Vahanen Rakennusfysiikka Oy

Termi ”6-vaihe” tulee keräimessä käytettyjen siivilällisten tasolevyjen (numeroitu 1-6) lukumäärästä. Keräimen toimintaperiaate perustuu tasolevyjen läpi virtaavaan ilmaan, jossa jokainen tasolevy rajoittaa ilman liikettä eriasteisesti. Jokaisessa tasolevyssä on siivilät, joiden reikien pinta-ala pienenee tasolevyittäin tasolevyn 1 ollessa reikien pinta-alaltaan suurin ja tasolevyn 6 ollessa pienin. Reikien pinta-alat vaikuttavat eriasteisesti niiden läpi virtaavan ilman virtausnopeuteen ja virtausvastukseen aiheuttaen erikokoisten hiukkasten deposition. Depositionmekanismina on impaktio, eli suora törmäys, joka tapahtuu, kun hiukkanen ei massansa hitauden takia pysty seuraamaan kääntyvää ilmavirtausta vaan törmää esteeseen eli tasolevyn sisällä olevaan maljaan. Kun näytteenotto on suoritettu, toimitetaan suljetut mikrobinäytemaljat laboratorioon viljelyyn kasvatusta varten. Viljelyn jälkeen mikrobinäytteistä lasketaan pesäkkeen muodostavat yksiköt sekä tunnistetaan suvut. Lajit tunnistetaan mahdollisuuksien mukaan.

Sisäilman sieni-itiöpitoisuuksien merkittävyyttä sisäilmaan ei voida määrittää tarkoilla ohje- tai raja-arvoilla jo pelkästään sisäilman mikrobipitoisuuksien voimakkaiden vaihteluiden vuoksi. Pitoisuuksien vaihtelut syntyvät esimerkiksi ulkoilman mikrobipitoisuuksien vaihteluista eri vuodenaikoina, rakennuksen tiiviyydestä sekä ilmanvaihdon toiminnasta. Talvisin ulkoilman mikrobipitoisuudet ovat pienimmillään ja kesäisin suurimmillaan pitoisuuksien vaihteluvälin ollessa suuri. Ulkoilman pitoisuudet voivat vaihdella kymmenistä pesäkkeen muodostavista yksiköistä jopa tuhansiin yksikköihin per kuutio ilmaa [10]. Ulkoilman mikrobipitoisuuksien vaihteluiden vuoksi sisäilman mikrobimittaukset suositellaan suoritettavaksi talvisin, jotta ulkoilmasta peräisin olevien mikrobien määrä olisi mahdollisimman vähäinen.

Kaupin tekemässä opinnäytetyössä [11] tutkittiin, voiko rakenteesta otettavia ilmanäytteitä käyttää apuna tutkittaessa rakenteiden kuntoa ja mahdollisten rakenteissa olevien mikrobivaurioiden vaikutuksia sisäilman laatuun. Tutkimuksessa otettiin ilmanäytteitä betonirakenteiden eristetiloista, joissa mitatut ilman mikrobipitoisuudet olivat kokonaispitoisuudeltaan maksimissaan  $900 \text{ pmy/m}^3$ . Tutkimuksessa havaittiin yhtäläisyyksiä mikrobilajistossa sisäilmasta otetun ja rakenteesta otetun ilmanäytteen välillä. Tutkimuksen yhtenä johtopäätöksenä oli, että ilmanäytteenotto rakenteista voi olla käyttökelpoinen silloin, kun epäillään vaurion sijaitsevan rakenteessa ja pohditaan sen vaikutusta sisäilman laatuun.

Malisen vuonna 2015 tehdyssä diplomityössä [12] tutkittiin välipohjana toimivan kaksoislaattapalkiston kotelotilan mikrobipitoisuuksia kokeellisella ilmanäytteenottomenettelmällä Andersen-keräimillä verraten niitä sisäilmasta otettuihin ilmanäytteisiin sekä rakenteista otettuihin materiaalinäytteisiin. Kotelotiloista otettujen ilmanäytteiden sieni-itiöpitoisuudet olivat välillä  $9\text{--}88 \text{ pmy/m}^3$ . Tulosten perusteella esitettiin, että jossain tapauksissa kotelotiloista otetuista ilmanäytteistä voi olla hyötyä vauriolaajuuden karjoittamiseen. Kotelotiloista otetulla ilmanäytteellä päästiin tutkimuksen perusteella samaan tulokseen kotelotiloissa olevan luonnonmateriaalin vaurioitumisen suhteen kuin materiaalinäytteenkin perusteella.

Kurnitskin *et al.* tekemän tutkimuksen [13] osana mitattiin rakennusten ryömintätilojen mikrobiologisia oloja sekä selvitettiin alapohjan läpi ryömintätilasta kulkeutuvien homeitiöiden leviämiskeinot. Mitattujen kohteiden ryömintätilojen ilman mikrobipitoisuudet olivat kokonaispitoisuudeltaan MEA-alustalla maksimissaan 13000 pmy/m<sup>3</sup> ja DG18-alustalla 15000 pmy/m<sup>3</sup>. Tutkimuksen yhtenä johtopäätöksenä esitettiin, että korkea mikrobien pitoisuus ryömintätilassa saattaa altistaa asukkaita mikrobeille epäsuorasti, mikäli ryömintätilan ja sisätilojen välinen ulkovaippa ei ole tiivis.

Rautialan tekemän tutkimuksen [14] osana mitattiin sisäilman sieni-itiöpitoisuuksia mikrobivaurioituneista rakennuksista ennen rakennusten korjaustöiden purkuvaiheen aloittamista, purkutöiden aikana sekä 1-6 kk korjaustyön valmistuttua. Ennen purkua mitatut pitoisuudet olivat keskimäärin maksimissaan 430 pmy/m<sup>3</sup>, purkutöiden aikana maksimissaan 23000 pmy/m<sup>3</sup> ja 1-6 kk korjaustyön valmistumisen jälkeen 50 pmy/m<sup>3</sup>.

### **2.4.3 Rakennusten terveydelliset olosuhteet ja sieni-itiöpitoisuuksien viitearvot**

Nykyinen ns. asumisterveysasetus [15] asettaa vaatimukset asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisille olosuhteille. Asumisterveysasetus määrittelee toimenpiderajan, jolla tarkoitetaan pitoisuutta, mittaustulosta tai ominaisuutta, jolloin tulee ryhtyä toimenpiteisiin terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa sen poistamiseksi tai rajoittamiseksi. Mikrobeihin liittyvän toimenpiderajan ylittymisenä pidetään korjaamatonta kosteus- tai lahovauriota, aistinvaraisesti todettua ja tarvittaessa analyysillä varmistettua mikrobikasvua rakennuksen sisäpinnalla, sisäpuolisessa rakenteessa tai lämmöneristeessä silloin, kun lämmöneriste ei ole kosketuksissa ulkoilman tai maaperän kanssa, taikka mikrobikasvua muussa rakenteessa tai tilassa, jos sisätiloissa oleva voi sille altistua. Asetuksen mukaan asunnon ja muun oleskelutilan mahdollinen terveyshaitta on arvioitava kokonaisuutena siten, että altisteen toimenpiderajaa sovellettaessa otetaan huomioon altistumisen todennäköisyys, toistuvuus ja kesto, mahdollisuudet välttää altistumiselta tai poistaa haitta ja poistamisesta aiheutuvat olosuhteet ja muut vastaavat tekijät.

Asumisterveysohje [4] esittää viitearvoja taajamassa sijaitsevien asuntojen sisäilman sieni-itiöpitoisuuksille talviaikana. Ohjeen mukaan sisäilman sieni-itiöpitoisuudet 100–500 pmy/m<sup>3</sup> viittaavat kohonneeseen sieni-itiöpitoisuuteen. Jos samalla mikrobilajisto on tavanomaisesta poikkeava, on mikrobikasvuston esiintyminen todennäköistä. Ohjeen mukaisesti, jos taajamassa sijaitsevan asunnon sisäilman sieni-itiöpitoisuudet ovat talviaikana yli 500 pmy/m<sup>3</sup>, ovat ne kohonneita ja mikrobikasvustoon viittaavia. Ohjeessa viitataan lisäksi, että muissa sisätiloissa kuin asunnoissa, esimerkiksi toimistoissa ja kouluissa mikrobipitoisuudet ovat yleensä pienempiä kuin asunnoissa. Muiden sisätilojen osalle asumisterveysohje ei kuitenkaan ohjeista viitearvoja.

Työterveyslaitos esittää viitearvoja sieni-itiöpitoisuuksille toimistotyöympäristöissä sellaisissa rakennuksissa, joissa on koneellinen ilmanvaihto [16]. Ohjeen mukaan talvi-

aikana yli 50 pmy/m<sup>3</sup> sieni-itiöpitoisuus ilmanäytteessä kertoo kohonneesta pitoisuudesta ja viittaa sisäilman epätavanomaiseen mikrobilähteeseen. Viitearvon suuruus perustuu Etelä-Suomessa tehtyihin tutkimuksiin, joissa 100 % sisäilman pitoisuuksista on ollut alle ko. pitoisuustason kosteusvaurioitumattomissa toimistorakennuksissa.

Koulurakennusten sisäilman sieni-itiöpitoisuuksien tulosten tulkintaa on ohjeistettu mm. Koulurakennusten kosteus- ja homevauriot – julkaisussa [17], jossa tulosten tulkintaperusteita esitetään seuraavasti. Rakennus voidaan luokitella vauriottomaksi mittaustulosten perusteella, joissa on enintään muutama 50 pmy/m<sup>3</sup> ylittävä tulos, joiden mediaani eli keskimääräinen arvo on alle 12 pmy/m<sup>3</sup> ja joissa esiintyy useita ”nolla” – tuloksia. Mittaustulokset viittaavat vaurioon, jos rakennuksesta on mitattu useita 50–200 pmy/m<sup>3</sup>, joiden mediaani on yli 20 pmy/m<sup>3</sup> ja joissa esiintyy harvoja ”nolla” – tuloksia.

Mittaustuloksia joudutaan tulkitsemaan tapauskohtaisesti, koska rakennuksen käyttötapa ohjaa erilaisten viitearvojen käyttöön. Mittaustulosten tulkinnassa tulee lisäksi huomioida työturvallisuuslain määritelmät työpaikan terveydellisistä vaatimuksista sekä huomioida esimerkiksi työpaikan määritelmä. Esimerkiksi työsuojeluasetuksessa varsinaiseksi työpaikaksi voidaan määritellä paikka, jossa työntekijä vakituisesti työskentelee, josta työntekijä hakee työmääräykset tai säilyttää työssä käyttämiään varusteita ja välineitä. Varsinaisena työpaikkana ei pidetä työtekemispaiikkaa, jonne työntekijä tekee työmatkan. Tämä voi vaikuttaa myös mittaustulosten tulkintaan sellaisissa tiloissa, joissa ei ole yhtä selkeää käyttötarkoitusta, esimerkiksi asuntoa tai asunnon kaltaista oleskelutilaa, joka on myös jonkun työpaikka. Toisena mahdollisena esimerkkinä voidaan esittää esimerkiksi koulujen luokkatilat, päiväkotien ryhmätilat tai hoivakotien asuinhuoneet, jotka eivät ole varsinaisia työpaikkoja, vaan työtekemispaiikkoja.

Kokonaisuudessaan sisäilman mikrobipitoisuuksien aiheuttamat toimenpiderajat ja -suositukset tulee arvioida useammasta näkökulmasta koko rakennuksen osalta. Arvioinnin suorittavan toimijan pätevyys, ammattitaito sekä sisäilman laatuun vaikuttavan kokonaisuuden hallinta ovat oleellisia tekijöitä arvioitaessa rakennuksen terveellisyyteen vaikuttavia olosuhteita ja riskejä, koska muun muassa ns. asumisterveysasetuksen määritelmät voivat mahdollistaa toimenpiderajojen tulkinnoissa näkemyseroja. Varsinaisen terveyshaitan voi kuitenkin arvioida vain terveysviranomainen.

#### **2.4.4 Mikrobien kasvuedellytykset betonirakenteissa**

Betonia ei yleisesti pidetä mikrobivaurioille herkkänä rakennusmateriaalina. Viitasen tekemässä tutkimuksessa [18], jossa selvitettiin betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittisiä olosuhteita, saatiin tulokseksi, että ilmaan rajoittuvissa pinnoissa homekasvun rajakosteus on puhtaasti betonin osalta yli 88–90 %RH. Tällöin pintaan kertynyt orgaaninen aines muodostaa homeen kasvun kannalta kriittisen rajapinnan. Tutkimuksen mukaan betonipinnan mikrobikasvun syntymiseen vaikuttaa betonin pinnan vanheneminen, pintakäsittely sekä betonin pintaan ajan mittaan kertyvä aines. Tii-



viissä betonirakenteessa (toiseen materiaaliin rajoittuva pinta) mikrobikasvun rajakosteus on puhtaasti betonin osalta 97–98 %RH.

Mikrobikasvua rajoittavana tekijänä betonissa pidetään myös materiaalin emäksisyyttä eli pH-arvoa. Sisäilmayhdistyksen Terveelliset tilat – tietojärjestelmän [19] mukaan mikrobit kasvavat laajalla pH-alueella 1.4...10 niiden optimialueen ollessa 4...7. Betonin pH-arvo uudella betonilla on 13...14 ja noin 8...12 karbonatisoituneella betonilla. Betoni siis itsessään tarjoaa heikot kasvuolosuhteet mikrobeille.

Vinha *et al.* esittävät seminaarijulkaisussa [20] VTT:n ja TTY:n yhteistyössä laaditun homemallin toimintaperiaatteita ja käyttöä kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa. Homemallissa on tarkasteltu monien eri rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisherkkyyttä. Homemallissa esitettyyn homehtumisherkkyyksiluokissa on arvioitu materiaalin homehtumisominaisuuksista homeen kasvun liikkeellelähtö, homehtumisen maksimitaso ja homekasvun taantuminen. VTT-TTY homemallin mukaiset rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyksien luokittelut ovat esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 2).

**Taulukko 2.** Rakennusmateriaalien luokittelu VTT-TTY homemallin homehtumisherkkyyksiluokkiin [20].

Homehtumisherkkyyksiluokka	Rakennusmateriaali
Hyvin herkkä HHL1	karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä HHL2	höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy
Kohtalaisen kestävä HHL3	mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni (kuuluu homeen kasvunopeuden osalta luokkaan HHL2), kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
Kestävä HHL4	lasi ja metalli, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuojaj-aineita sisältävät materiaalit

Luokittelun mukaisesti sementtipohjaiset tuotteet kuten betoni kuuluvat hometta parhaiten kestäviin rakennusmateriaaleihin. Vanha karbonatisoitunut betoni luokitellaan luokkaan HHL3 ja alkalinen (eli korkean pH-arvon omaava) uusi betoni luokkaan HHL4. Uuden ja vanhan betonin luokitteluerot selittävät betonin emäksisyyden muutokset eri vaiheissa betonin karbonatisoitumisen johdosta sekä mahdolliset betonin pinnan muutokset betonin ikääntyessä esim. kutistuman sekä betonin pintaan kertyneen orgaanisen aineksen vaikutuksesta. Yleensä homeen kasvu tapahtuu materiaalin pinnalla. Hyvin homehtumista kestävässä betonissa pinnan sopivat kosteus- ja lämpöolosuhteet sekä pintojen epätasaisuudet, kuten kolot ja halkeamat, joissa home voi kasvaa, voivat jo pelkästään mahdollistaa homekasvun syntymisen.

## 2.4.5 Epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan betonirakenteissa

Nykyisin tiedetään, että rakenteissa olevien epäpuhtauksien, kuten mikrobien, on mahdollista kulkeutua sisäilmaan ilmavirtauksien mukana. Vaikka syy-seuraussuhde kytetään usein osoittamaan, niin rakenteiden epäpuhtauksien moninaisia vaikutuksia sisäympäristöön ei ole pystytty arvioimaan kokonaisuutena. Kun esimerkiksi mikrobiston kasvualustan vaatimukset, kasvunopeus, elinympäristön olosuhdevaihteluiden kesto, sieni-itiöiden koko ja sieni-itiötuotto vaihtelevat, niin on usein mahdotonta rajata sisäilmaongelman laatu tai vakavuus pelkästään mikrobinäytteenoton perusteella tehtyihin johtopäätöksiin perustuen.

Pessi *et al.* havaitsivat tutkimuksessaan [21] yhteyden betonielementtijulkisivun eristetilän mikrobien ja sisäilman mikrobien välillä. Näytteenotto sieni-itiöpitoisuuksien osalta suoritettiin eristetiloista materiaalinäytteenottomenetelmällä pääosin betonielementtien reuna-alueilta ja sisäilmasta ilmanäytteenottomenetelmällä Andersen-keräimellä. Näytteiden mikrobipitoisuus tutkittiin viljelymenetelmällä MEA-kasvatusalustalla. Tutkimuksessa havaittiin elementin eristetilän reunaosissa esiintyneen runsaan sädesienikasvun vaikuttavan sisäilman laatuun. Havaitut epäpuhtaudet ovat päässeet sisäilmaan rakenteen epätiiviyskohtien kautta. Tarkasteltaessa muiden bakteerien ja yleisimpien sieniryhmien pitoisuutta ei niissä havaittu vastaavaa eristeen ja sisäilman yhteyttä. Kun sisäilmapitoisuuksista vähennettiin selkeästi ulkoilmaan viittaavan lajiston osuus, oli tilastollisesti havaittavissa yhteys eristemateriaalin ja sisäilman sieni-itiöpitoisuuksien välillä, mutta vaikutus muiden tekijöiden rinnalla oli käytännössä olematon. Betonielementeissä suurin mikrobikontaminaation osuus oli elementin keskeltä otetuissa näytteissä. Tutkimuksessa ei mitattu rakenteiden suhteellista kosteutta tai eristetilän huokosilman kosteutta eristetilasta otetun materiaalinäytteenoton yhteydessä eikä arvioitu rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta kokonaisuutena. Tutkimuksen mukaan kuitenkin ulkoisen runsaan näkyvän kosteusrasituksen ja eristetilän mikrobikasvustojen välillä valitsi selvä yhteys. Lisäksi tutkituissa kohteissa havaittiin sisäilman kosteuspitoisuuden vaikuttavan mikrobien mitattavuuteen sisäilmassa. Kaikkien tutkittujen mikrobien pitoisuudet laskivat ilman kosteuspitoisuuden laskiessa.

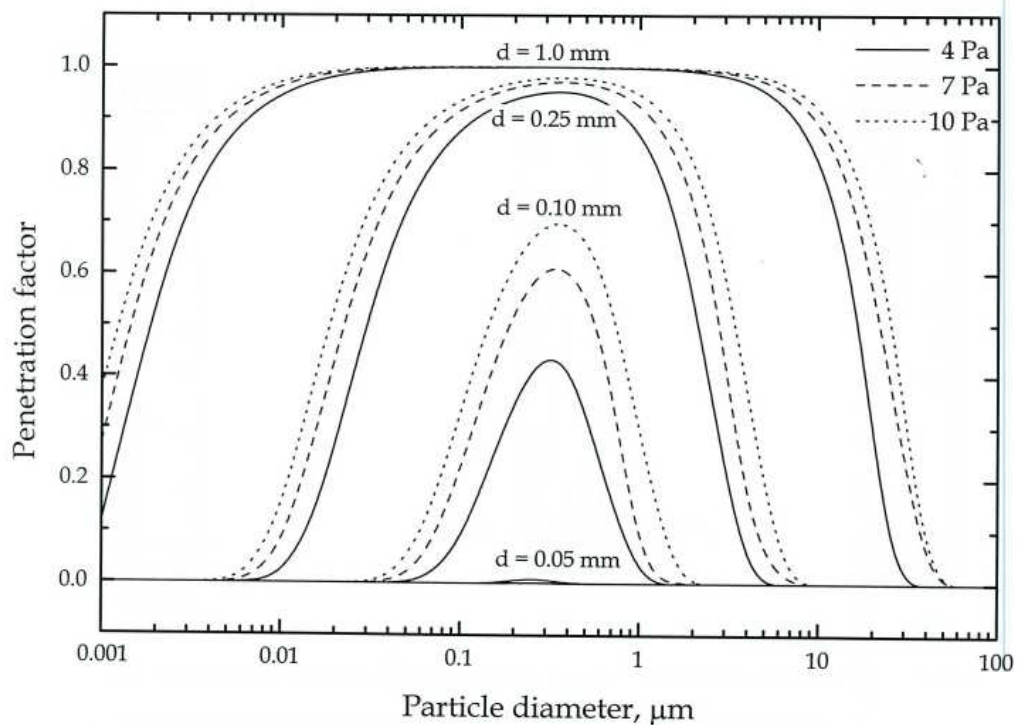
Mikrobien detektioon mittausympäristössä vaikuttavat muun muassa vallitseviin olosuhteisiin ja keräysmenetelmään liittyvät tekijät. Kuten Pessi *et al.* havaitsivat tutkimuksessaan, kun kosteuspitoisuus ilmassa laskee, niin laskee myös ilmasta mitattu mikrobipitoisuus. Tähän on todennäköisemmin syynä mittausmenetelmässä käytettyjen maljojen pintojen kuivuminen, mikä on voinut heikentää mikrobien impaktiota maljojen pintoihin. Kun tutkimuksessa ei todettu mikrobilähteiden kosteuspitoisuuksia, on vaikeaa esittää luotettavasti sisäilman mikrobien ja eristetilän mikrobilähteiden välinen korrelaatio. Mikrobinäytteiden viljelymenetelmässä käytetty MEA-kasvatusalusta suosii mesofiilisiä eli suhteellisen kosteissa olosuhteissa viihtyviä mikrobilajeja. Asumisterveysoppaan [22] mukaan kosteusvauriorakennuksissa suositeltava kasvualusta onkin MEA.

Jos kyseessä on vanha, kuivunut vaurio tai kosteusvaurion reuna-alue, niin materiaaleissa saattaa kasvaa myös kuivemmalla alustalla viihtyviä eli kserofiilisiä lajeja, jotka kasvavat parhaiten DG18-alustalla. Asumisterveysohjeen [4] mukaan DG18-alustaa voidaan käyttää MEA-alustan rinnalla, mutta molempien alustojen tarpeellisuutta ilmanäytteenottomenetelmässä ei ole esitetty.

Häkkilän tekemässä tutkimuksessa [23] vertailtiin Andersen-keräimellä otettuja sieni-itiöpitoisuuksien ilmanäytteitä kahdelle eri kasvatusalustalle (MEA ja DG18). Tutkimuksen mukaan 12 näytteessä viitearvot ylittyivät vain DG18-kasvatusalustalla yhteensä 48:sta ilmanäytteenottomenetelmällä otetusta vaurionäytteestä. Näytteiden kokonaismäärä oli 163 kappaletta. Ilman DG18-alustan käyttöä 7 % viitearvot ylittävistä vaurionäytteistä olisi jäänyt havaitsematta kaikista otetuista näytteistä. Niissä näytteissä, joissa viitearvojen ylitys havaittiin yhdellä tai useammalla alustatyypillä, oli DG18-kasvatusalustan osuus 25 %.

Mikrobien kulkeutumista sisäilmaan paine-eron vaikutuksesta on tutkittu vuonna 2012 valmistuneessa diplomityössä [24]. Kyseisessä työssä vertailtiin ilmanäytteenottomenetelmällä otettuja sisäilmanäytteitä normaaleissa ja tehostetun alipaineen olosuhteissa. Tutkimuksessa tarkastellut rakennuksen ulkoseinärakenteet olivat pääasiassa tiilimuureja ja ryömintätalalliset alapohjarakenteet kaksoisbetonilaattoja. Tutkimuksessa havaittiin, että näytteiden mikrobilajistot muuttuivat alipaineistetussa mittauksessa. Alipainenäytteissä oli normaalinäytteitä enemmän kosteusvaurioon viittaavia lajeja, mikä viittasi vuotoilman tulleen myös vaurioituneista rakenteista sisäilmaan. Johtopäätöksenä tutkimuksessa esitettiin, että rakennuksen alipaineistus ei lisää mikrobipitoisuuksia, mikäli mikrobikasvustoa sisältävä rakennealue on pieni. Tehtyyn tutkimukseen liittyy kuitenkin paljon epävarmuustekijöitä. Tutkimuksessa mitattu rakennuksen ilmanvuotoluku  $n_{50}$  oli 6 l/h, joka vastaa tasoltaan keskimääräistä heikompaa ilmatiiviyyttä. Tutkimuksessa ei pystytty esittämään tarkkoja epäpuhtauslähteitä ja niiden ilmavuotoreittejä sisäilmaan. Paine-eroa mitattiin vain rakennuksen ulkovaipan yli, joka ei kerro riittävällä varmuudella rakenteen sisäosan (kuten rakenteen eristetilan ja sisäkuoren rajapinta) ja sisäilman välisiä painesuhteita.

Mikrobien koon on havaittu useissa tutkimuksissa vaikuttavan niiden kykyyn liikkua ilmavirtausten mukana ja erilaisten rakojen läpi. Maailman terveysjärjestön (WHO) tekemässä yleisohjeessa [25] on yhteenveto useista eri tutkimuksista, joissa on tutkittu partikkeleiden läpäisyä rakojen läpi. Vette *et al.* [26] tutkimuksen mukaan 0,5-2,5  $\mu\text{m}$  kokoisten partikkeleiden läpäisykyky on ollut noin 50–90 % tutkitun rakennuksen ulkovaipan läpi ulko- ja sisäilman partikkeleiden erotuksen mittaamalla. Liu ja Nazaroff esittävät tutkimuksessaan [27], että 0,1-1  $\mu\text{m}$  kokoiset partikkelit menevät raosta tehokkaimmin läpi seuraavan kuvaajan (Kuva 4) mukaisesti, kun raon leveys 0,25 mm tai enemmän, olettaen paine-eron olevan 4 Pa tai enemmän ja virtausreitin pituuden ollessa 3 cm tai vähemmän.



Particle penetration factor as a function of particle diameter, crack height, and pressure difference for a straight-through crack with flow length  $z = 3 \text{ cm}$ .

**Kuva 4.** Kuvaajassa esitetään halkaisijaltaan erikokoisten ( $0,001\text{--}100 \mu\text{m}$ ) partikkeleiden läpäisykerroin (penetration factor) eri levyisissä raoissa ( $d=0,05 \text{ mm--}1 \text{ mm}$ ) kolmessa eri paine-erossa, kun raon syvyys (virtausreitin pituus) on  $3 \text{ cm}$  [27].

Edellä esitetyn kuvaajan (Kuva 4) perusteella partikkeleiden läpäisykyky kasvaa, kun raon leveys kasvaa. Kun raon leveys on  $1 \text{ mm}$ , niin valtaosa  $0,01\text{--}10 \mu\text{m}$  kokoisista partikkeleista liikkuu raon läpi. Raon leveyden pienentyessä alle  $0,25 \text{ mm}$  partikkeleiden läpäisykyky vähenee merkittävästi. Liu ja Nazaroff toteavat kuitenkin tutkimuksessaan rakojen läpi kulkeutuvien partikkeleiden analyyseissä suurimpina rajoitteina olevan niiden oletusten, että rakojen geometria on säännöllistä ja että rakojen pinnat ovat sileitä. Tutkimuksessa esitetäänkin, että käytännön olosuhteissa rakojen geometrian epäsäännöllisyys ja rakojen pintojen karheus voivat lisätä partikkeleiden depositiota merkittävästi.

#### 2.4.6 Maa-aineksen ilmanläpäisevyyden merkitys maanvastaisissa rakenteissa

Betonirakenteiden kautta kulkeutuviin epäpuhtauspitoisuuksiin vaikuttaa painesuhteiden mahdollistamien ilmapirtauksien lisäksi oleellisesti myös lähteen mahdollistamat ilmapirtaukset, kuten betonin ulkopintaa vasten olevan materiaalin ilmanläpäisevyys. Esimerkiksi, jos kyseessä on maanvastainen betonirakenne, eli rakenteen ulkopinta on maaperää vasten, tulee arvioitavaksi myös maa-ainesten ilmanläpäisevyys.

Eri maa-ainestyyppien ilmanläpäisevyyksiä on esitetty muun muassa Radonin merkitys talorakennustekniikassa – julkaisussa [28], jossa ohjeistetaan mitoitusperiaatteet rakennuspohjan tuuletuksen suunnitteluun. Mitoitus perustuu Darcyn lakiin, jonka laskennan perusteella voidaan kuvata huokoisen aineen läpi tapahtuvaa virtausta. Julkaisussa maa-ainesten ilmanläpäisy eli aineen mahdollistama permeabiliteetti esitetään jokaiselle huokoiselle aineelle ominaisella läpäisevyysarvolla  $K$  ( $m^2$ ), joka ilmaisee kyseessä olevan aineen kyvyn läpäistä nestettä, vettä tai ilmaa. Kun läpäisevyysarvo  $K$  jaetaan ilman dynaamisella viskositeetilla ( $17,5 \cdot 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}/m^2$ ), saadaan määritettyä maa-aineen ilmanläpäisevyys  $L$  ( $m^3/(m^2\cdot s\cdot Pa)$ ). Läpäisevyysarvo  $K$  vaihtelee eri maalajeilla ja rakennusmateriaaleilla ja niissä voi esiintyä paikallisiakin vaihteluja. Maa-aineen ilmanläpäisevyyteen vaikuttaa merkittävästi aineen kosteuspitoisuus ja huokoisuus. Aineiden ilmanläpäisevyys on jaettu julkaisussa karkeasti kolmeen eri ryhmään seuraavan taulukon (Taulukko 3) mukaisesti.

**Taulukko 3.** Aineiden jakaminen ilmanläpäisevyyden  $L$  perusteella [28].

Läpäisevä	Puoliläpäisevä	Läpäisemätön
$\dots 10^{-10}$	$10^{-10} \dots 10^{-12}$	$10^{-12} \dots$

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 4) on esitetty eri maalajien raekokojen suuruusluokkia sekä ohjeellisia läpäisevyysarvoja ja ilmanläpäisevyyksiä.

**Taulukko 4.** Ohjeelliset läpäisevyysarvot ja ilmanläpäisevyydet eri raekoon omaaville maalajeille. [28] ja [29].

Maalaji tai lajite	Rakeiden läpimitta mm	Läpäisevyysarvo $K$ , (permeabiliteetti, $m^2$ )	Ilmanläpäisevyys $L$ ( $m^3/(m^2\cdot s\cdot Pa)$ )
Kostea savi	$< 0,002$	$10^{-15}$	$5,7 \cdot 10^{-11}$
Siltti ja silttimoreeni	$0,006-0,002$	$10^{-14}$	$5,7 \cdot 10^{-10}$
Hiekkamoreeni	$0,06-2$ , sis. $> 0,06$ hienoainesta $5\ldots 50\%$	$10^{-13}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$
Soramoreeni	$< 2$ , sis. $> 0,06$ hienoainesta $\geq 5\%$	$10^{-12}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$
Hienohiekka ja kes-	$0,2-0,6$	$10^{-11}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$

kitiivis hiekka			
Keskihiekka	0,06-2	$10^{-10}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$
Hienosora ja keskitiivis sora	2-20	$10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$
Karkea sora ja sepe- li*	20-60 (sepe- 5-32)	$10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$

*\*= Sepelin ohjeellista läpäisevyysarvoa K ei ole arvioitu, mutta ilmanläpäisevyydestään sepele vastaa vähintään karkeaa soraa, koska sepele ei sisällä hienoaainesta.*

Maalajien ilmanläpäisevyyden tason arvioimiseksi esimerkiksi betonin keskimääräinen läpäisevyysarvo K on  $10^{-16}$  ja ilmanläpäisevyys L  $5,7 \cdot 10^{-12}$ . Läpäisevyysarvot perustuvat laskennallisesti merkittävältä osalta aineen vedenläpäisevyysskertoimeen. Vedenläpäisykerroin esitetään usein muodossa m/s, eli kuinka monta metriä sekunnissa vesi liikkuu tasalaatuisessa maa-aineksessa.

Eri maa-ainesten ilmanläpäisevyyteen vaikuttaa oleellisesti maalajien raekoot sekä kosteuspitoisuus. Mitä suurempi raekoko maalajilla on, sitä huokoisemmaksi maa-aines muuttuu, jos maa-aines on homogeenistä. Keskimäärin suurirakeisen maa-aineksen huokoisuuteen vaikuttaa maa-aineksen seassa oleva hienoaaines. Kun hienoainekseen määrä kasvaa suurirakeisen maa-aineksen seassa, niin maa-aineksen ilmanläpäisevyys heikkenee. Maa-aineksen kosteuspitoisuus vaikuttaa myös huokoisuuteen. Hienojakoisessa maa-aineksessa riittävä vesisisältö voi ns. ”kyllästä” esimerkiksi kapillaarisesti koko maa-aineksen tilavuuden, jolloin maa-aineksen rakeiden välit ovat täynnä vettä. Tällöin maa-aineksen ilmanläpäisevyys heikkenee huokosissa olevan veden aiheuttaman virtausvastuksen lisääntymisen vuoksi. Kun maa-aines kuivuu ja ns. vapaa vesi huokosista poistuu, ilmanläpäisevyys paranee.

Rakennuksen pohjarakenteissa käytetyn maa-aineksen ilmanläpäisevyyteen ja alapohjarakenteen alapuolisiin ilmavirtauksiin vaikuttaa myös maa-aineksen tilavuuden muutokset. Maa-aineksen tilavuus voi muuttua esim. riittämättömän tiivistyksen tai maa-aineksen seassa olevan jään sulamisen vuoksi, jolloin maa-aines voi painua. Maa-aineksen painuminen voi muodostaa esimerkiksi maanvastaisen alapohjarakenteen alle ilmapölyn tai ilmataskuja, joissa ilma liikkuu huomattavasti tehokkaammin.

Nykyiset rakentamismääräykset ja ohjeistukset ovat ohjanneet pohjarakentamisessa raekooltaan suurien maa-ainesten käyttöön. Määräykset ja ohjeet perustuvat kosteustekniseen näkökulmaan, jonka perustana on maaperästä nousevan kapillaarikosteuden estäminen ja rajoittaminen. Mitä karkeampaa ja suurirakeisempaa maa-aines on, sitä heikommin vesi liikkuu maa-aineksessa kapillaarikosteuden muodossa. Karkeiden maalajien käyttö on kuitenkin lisännyt mahdollisuuden maaperän epäpuhtauksien siirtymiseen

rakenteiden liittymien kautta sisäilmaan. Esimerkiksi alapohjarakenteen alapuolisessa maa-aineksessa huokosilman suhteellinen kosteus on usein hyvin korkea, joka on yksi mikrobikasvun edellytys. Lisäksi alapohjarakenteen läpi sisäilmasta johtuva lämpö sekä maaperän oma lämpötila voivat mahdollistaa maaperän mikrobistolle suotuisat kasvuolosuhteet. Maanvastaisten rakenteiden ilmatiiviynen tärkeys korostuu useimmiten sellaisissa pohjarakenteiden olosuhteissa, joissa rakenteen ulkopuolisen täyttömaan ilmanläpäisevyys on suuri ja maataytön olosuhteet mahdollistavat mikrobikasvun.

## **2.5 Betonirakenteiden ilmatiiviys**

### **2.5.1 Yleistä**

Tarkasteltaessa betonirakenteiden ilmatiiviyttä keskeisimpiä rakenteita ilmatiiviynen kannalta ovat ulkovaipparakenteet. Rakennuksen betoninen ulkovaippa on yleensä ilmayhteydessä maaperään tai ulkoilmaan, jotka sisältävät jo luonnostaan epäpuhtauspitoisuuksia. Kerroksellisissa betonirakenteissa on mahdollista esiintyä epäpuhtauksia myös eri rakennekerroksissa, kuten eristetiloissa. Jos rakenteessa esiintyy ilmatiivisyypuutteita, on rakenteen läpi kulkevien ilmavirtauksien mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien mahdollista heikentää sisäilman laatua ja terveellisyyttä rakennetta ympäröivien lämpö- ja kosteusolosuhteiden sekä riittävän suurien epäpuhtauslähteiden vaikutuksesta.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D3 [30] määrää, että rakennuksen ulkovaiipan ja tilojen välisten rakenteiden tulee olla niin ilmanpitäviä, että vuotokohtien läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eivät aiheuta merkittäviä haittoja rakennuksen käyttäjille, rakenteille tai rakennuksen energiatehokkuudelle. Erityistä huomiota tulee kiinnittää rakenteiden liitosten ja läpivientien suunnitteluun sekä rakennustyön huolellisuuteen. Rakenteisiin on tarvittaessa tehtävä erillinen ilmansulku.

### **2.5.2 Ilmatiiviynen toteutus betonirakenteissa**

Betonin valmistuksen, betonoinnin ja jälkihoidon ohjeistukset ovat kehittyneet paljon 1990-luvulta lähtien. Uudet menetelmät mahdollistavat rakenteen paremman ilmatiiviynen vanhoihin betonirakenteisiin nähden. Nykyisten ohjeiden mukaan rakenteet sekä niiden väliset liitokset ja läpiviennit suunnitellaan ja toteutetaan ilmavirtaukset estävillä ilmasuluilla. Ilmansulun tehtävänä on estää haitalliset ilmavirtaukset rakenteista rakennuksen sisälle ja toisinpäin. Betonia pidetään yleisesti riittävän ilmanpitävänä ilmasulkuna, jos rakenteen saumat on tiivistetty huolellisesti. Saumojen tiivistykset toteutetaan rakennusvaiheessa juotosvaluilla tai joustavilla massoilla yhdistettynä pintojen kittauksiin. Lisäksi saumojen ilmansulkuina käytetään rakennepintoihin liimattavia ja hitsattavia tai rakennekerrosten väliin asennettavia ilmansulkukaistoja, kuten bitumikermikais-  
toja [3].

Rakennusvaipan ilmanpitävyydestä vastaava ainekerros eli ilmansulku sijoitetaan kerroksellisessa rakenteessa yleensä lämpimälle puolelle sisäpinnan lähelle. Ilmansulkuna voidaan käyttää esimerkiksi kalvoa, levyä, ilmanpitävää solumuovieristettä tai betonirakennetta, joiden saumat on tiivistetty huolellisesti. Ilmansulun ilmanläpäisykertoimen tulee olla riittävän pieni, jotta se estää haitalliset ilmavirtaukset rakennusosan läpi puolelta toiselle. Jos ilmansulku toimii rakenteessa lisäksi höyrynsulkuna, sen vesihöyrynvastuksen tulee olla riittävän suuri, jotta sisäilman kosteus ei pääse haitallisessa määrin tunkeutumaan rakenteeseen. Nämä ilmansulun ominaisuudet tulee säilyä koko rakennuksen elinkaaren ajan [31].

Ilmatiiviyteen liittyvät työvaiheet toteutetaan rakentamisessa usein normaalina rakennustyönä, jolloin ilmatiiviyttä ylläpitäviä rakennusmateriaaleja tai rakenneosia ei rakennusvaiheessa tarkasteta erikseen. Kokemukseen perustuen laadunvarmistus on aiemmin perustunut tavanomaisessa rakennustuotannossa käytännössä valmiiden rakennusten pintamateriaalien aistinvaraisiin tarkastuksiin sekä ilmatiiviysmittauksiin ilmavuotolukumäärittämällä. Nykyisin laadunvarmistuksen apuna pyritään hyödyntämään tarkentavia mittausmenetelmiä.

Rakentamisen ohjeistuksissa esim. RT-ohjekortissa ”Rakennusalan toleranssit” [32] käsitellään valmiiden rakenteiden toleransseja, eli rakenteiden tiettyjen mittojen sallittuja vaihteluja. Rakentamistoleranssi jakautuu kolmeen osa-alueeseen; valmistustoleranssiin, paikalleenmittaustoleranssiin sekä asennustoleranssiin, joiden suuruusluokat esimerkiksi betoni- ja betonielementtirakenteissa ovat jopa kymmeniä millimetrejä, jolloin rakenteiden ilmatiiviydessä korostuvat rakenteiden välisissä saumoissa ja liitoksissa ilmatiiviyttä ylläpitävät materiaalit.

### **2.5.3 Esimerkkejä ilmatiiviyden parantamiseen käytettävistä materiaaleista**

Ilmatiiviyden parantamiseen liittyvissä betoniin kohdistuvissa korjauksissa käytettäviä tuotteita ovat esimerkiksi joustavat tiivistys- ja saumaussmassat, tiivistysteipit ja liitosnauhat sekä vedeneristeet ja pinnoitteet. Yleisesti hyviä lähtökohtia ilmatiiviyden parantamiseen liittyvien korjausten tuotevalintoihin ovat tuotteen soveltuvuus ja asennettavuus korjauskohteeseen, hyvä muodonmuutoskyky ja ikääntymisen kesto, hyvä tartunta alustaan sekä vähäpäästöisyys.

Soveltuvat joustavat tiivistys- ja saumaussmassat ovat yksikomponenttisia polymeeripohjaisia tuotteita, jotka ovat luokiteltu asennettavaksi betonipinnalle ja soveltuvat betonin rakenneliittymien rakojen tiivistämiseen. Esimerkiksi julkisivuihin tarkoitetuille betonielementtien saumaussmassoille on arvioitu RT-ohjekortin ”*Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot*” [33] mukaan jopa 15 vuoden kunnossapitojakso.



Soveltuvat tiivistysteipit ja liitosnauhat ovat pääasiassa ikkunoiden/ovien ja ympäröivien rakenteiden välisissä liitoksissa, läpivienneissä sekä höyrynsulun saumoissa käytettäviä itseliimautuvia tuotteita. Osa tuotteista soveltuu myös asennettavaksi betonipintojen liittymiin suoraan tai pohjustusaineen kanssa. Ilmatiiviyn parantamiseen liittyvistä asennuksista käyttöikä tietoa on vielä vähän. Esimerkiksi eräälle tuotteelle on esitetty valmistajan toimesta vähintään 50 vuoden käyttöikä [1].

Soveltuvat vedeneristeet ja pinnoitteet jakautuvat kahteen perusryhmään, yksi- ja kaksikomponenttisiin tuotteisiin. Yksikomponenttiset tuotteet ovat asennusvalmiita sivelitäviä tai ruiskutettavia tuotteita. Kaksikomponenttiset tuotteet koostuvat kahdesta asennusvaiheesta sekoitettavasta ainesosasta. Betonirakenteisiin soveltuvat tuotteet asennetaan joko suoraan alustaan, pohjustusainetta käyttäen tai pohjustusainetta ja vahvikenauhaa käyttäen riippuen materiaalivalmistajan vaatimuksista. Ominaisuuksiltaan vastaaville märkätilan vedeneristeille on arvioitu RT-ohjekortin *”Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot”* [33] mukaan 30 vuoden tekninen käyttöikä normaaleissa rasitusolosuhteissa.

## 2.5.4 Betonin kuivumiskutistuman vaikutus

Kovettunut betoni kutistuu kuivuessaan ja laajenee kostuessaan. Betonin kutistumaan vaikuttaa oleellisesti jälkihoito, ympäristöolosuhteet sekä materiaalin ominaisuudet, kuten vesi-sementtisuhte, hienoainesmäärä ja betonin huokoisuus [34].

Betonin kuivumiskutistuma jakautuu kahteen vaiheeseen, varhais- ja myöhäisvaiheen kutistumaan. Varhaisvaiheen kutistuma syntyy ensimmäisen vuorokauden aikana valutuksesta ja se voi olla moninkertainen pitkäaikaiskutistumaan verrattuna. Varhaisvaiheen kutistuma on suuruudeltaan 0–7 mm/m riippuen betonin tyypistä, raudoituksen määrästä sekä jälkihoidon määrästä ja laadusta. Myöhäisvaiheen kutistuma eli pitkäaikaiskutistuma syntyy jopa useiden vuosien aikana betonin kosteuden tasoittuessa ympäristön olosuhteisiin. Pitkäaikaiskutistuma on suuruudeltaan 0–1 mm/m, mutta yleensä kuivissa sisätiloissa pitkäaikaiskutistuman suuruus on 0,4–0,6 mm/m [34].

Nykyisin betonin kutistumiseen vaikuttavat tekijät ja kutistuman vaikutukset tunnetaan valmistusmenetelmissä ja rakennustuotannossa hyvin. Muuan muassa Betonin kutistuma -artikkelissa [35] kuivumiskutistuman syntyminen on käsitelty periaatetasolla. Veden poistuminen pienentää betonin tilavuutta, mikä johtaa aina kutistumaan. Sementin reagoidessa kutistuminen lisääntyy, koska veden ja sementin muodostama sementtikivi (eli pasta) tarvitsee vähemmän tilavuutta kuin sementti ja vesi ennen reaktiota. Reaktion seurauksena betoni kuivuu sisäänpäin. Näin ollen betoni voi kuivua ja kutistua veden haihtumatta. ”Sisäisestä kuivumisesta” johtuvaa kutistumaa nimitetään autogeeniseksi kutistumaksi. Haihtumisesta johtuvaa kutistumaa nimitetään kuivumiskutistumaksi. Edellisten lisäksi mahdollinen karbonatisoituminen ja lämpötilan aleneminen kutistavat betonia. Artikkelin mukaan myös taloudelliset ja ympäristölliset tekijät ovat johtamassa

siihen, että tulevaisuudessa betonin valmistuksessa tultaneen enenevästi käyttämään sellaisia betonin osa-aineita, jotka osaltaan voivat lisätä kutistumaa.

Betonin kuivumiskutistuma on merkittävässä osassa rakenteiden ilmatiiviyyttä tarkasteltaessa. Riippuen betonin saumoihin ja liitoksiin asennettujen materiaalien muodonmuutuskyvystä, voi pitkäaikaiskutistuma aiheuttaa halkeilua materiaaleissa tai avata aiemmin tiiviinä olleita saumoja, koska ne ovat toteutettu betonin varhaiskutistuman jälkeisenä ajankohtana ja pitkäaikaiskutistuma ei ole vielä ehtinyt tapahtua. Tällöin myös rakennuksesta valmistumisvaiheessa mitattu ilmanvuotoluku voi olla huonompi myöhemmässä vaiheessa. Vanhoissa betonirakenteissa betonin laatu on voinut vaihdella, betonin jälkihoitoon ei ole välttämättä kiinnitetty huomiota eikä rakenteiden välisiä liitoksia ole tiivistetty, jolloin vaipan ilmanpitävyys voi mahdollisesti olla heikko rakenteiden liitoskohdissa pelkästään epätiiviiin rakennetyypin tai betonirakenteessa syntyneen kuivumiskutistuman johdosta.

## **2.6 Betonirakenteiden ilmatiiviyyteen liittyvät tutkimusmenetelmät**

### **2.6.1 Rakennuksen ilmanvuotoluvun määrittäminen**

Rakennuksen ulkovaipan ilmatiiviyyttä mitataan painekokeella, jossa tila tai rakennus alipaineistetaan 50 Pa:n alipaineeseen keinotekoisesti erillisellä painekoelaitteistolla. Painekokeen perusteella saadaan määritettyä rakennuksen ilmanvuotoluku  $q_{50}$  [ $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ] tai ilmanvuotoluku  $n_{50}$  [1/h]. Ilmanvuotoluku  $q_{50}$  ilmaisee, kuinka monta kertaa mitatun rakennuksen ilma vaihtuu tunnissa vuotokohtien kautta ulkovaipan pinta-alaan nähden, kun ulko- ja sisäilman välinen paine-ero on 50 Pa. Ilmanvuotoluku  $n_{50}$  ilmaisee, kuinka monta kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu yhdessä tunnissa rakennuksen ulkovaipan vuotoreittien kautta, kun sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero on +/- 50 Pa. Mitä pienempi ilmanvuotoluku on, sitä parempi on rakennuksen yleinen ilmatiiviytensä. Rakentamismääräyskokoelman osan D3 ohjeistuksen mukaan rakennusvaipan alhainen ilmanvuotoluku ei kuitenkaan takaa vaipparakenteiden moitteetonta toimintaa ilmatiiviyden osalta, koska vaipassa voi silti esiintyä paikallisesti merkittäviä ilmanvuotokohtia.

### **2.6.2 Lämpökuvaus**

Lämpökuvaus on ainetta rikkomaton rakennusten tutkimusmenetelmä, joka perustuu eri rakennepintojen kykyyn lähettää lämpösäteilyä infrapuna-aalloilla ja infrapunakameran kykyyn havaita näitä aallonpituuksia. Lämpökuvausta voidaan käyttää yhtenä tutkimusmenetelmänä niin uudisrakennusten laadunvalvontamittauksissa kuin vanhojen rakennusten kuntotutkimuksissakin [36].

Ulkoseinärakenteiden ilmanpitävyys voi paikoittain vaihdella, jolloin rakenteiden vuotokohtien läpi tuleva kylmä ilma jäähdyttää rakenteita aiheuttaen vedontunnetta, joka johtuu kylmän ilman liikkeen aiheuttamasta vedosta tai kylmien pintojen aiheuttamasta säteilyvedosta. Lämpökuvauksella voidaan määrittää nopeasti rakenteita rikkomatta lämpövuotokohtat sekä mahdollisesti havaita, onko kyseessä eristyspuute, ilmavuoto, kylmäsilta tai joissakin tapauksissa myös kosteusvaurio [36]. Lämpökuvaus jaetaan yksivaiheiseen ja kaksivaiheeseen kuvaustapaan. Yksivaiheisessa lämpökuvauksessa rakennus kuvataan normaaleissa käyttöolosuhteissa. Kaksivaiheisessa lämpökuvauksessa rakennus kuvataan kahdessa eri paine-olosuhteissa, normaaleissa käyttöolosuhteissa sekä tehostetussa alipaineisuudessa. Kaksivaiheisen lämpökuvauksen etuna on rakenteiden ilmavuotokohtien helpompi paikantaminen.

### 2.6.3 Merkkisavu

Ilmatiiviyteen liittyvissä tutkimuksissa käytettävää merkkisavua hyödynnetään aistinvaraisen katselumuksen yhteydessä. Merkkisavulla voidaan aistinvaraiseen havaintoon perustuen osoittaa ilmavirtauksen suunta sekä voimakkuuden suuruusluokka. [2]

Merkkisavuja on esimerkiksi kynämallisia ja ampullimallisia. Kynämallisessa merkkisavukynässä kynän sisällä oleva vaihdettava sydänlanka sytytetään kytemään ja siitä muodostuu näkyvää savua. Ampullimallisissa merkkisavuissa savuampulli rikotaan esimerkiksi pullon sisällä kokonaan tai molemmista päistään, kun käytössä on erillinen käsipumppu, jolloin ampullissa oleva aines reagoi ilman kanssa muodostaen näkyvää savua. Savuampullin käytön etuna suhteessa kytevään sydänlankaan on savun huoneilmaa vastaava lämpötila. Herkissä tarkasteluissa kytevän sydänlangan muodostavan savun lämpötila on usein huoneilmaa lämpimämpää, jolloin savu pyrkii nousemaa ylöspäin, jolloin pienet vuotoilmavirtaukset eivät välttämättä vaikuta savun liikkeeseen. Savuampullin muodostama savu pysyy hetken lähes paikallaan, kunnes pitoisuus sekoittuu huoneilmaan, jos tilassa ei tapahdu merkittäviä ilmavirtauksia.

### 2.6.4 Merkkiainetekniikka

Merkkiainetekniikan käytöstä ilmatiiviyden laadunvarmistustyökaluna on syksyllä 2015 valmistunut RT-ohjekortti ”Rakenteiden ilmatiivyyden tarkastelu merkkiainekokein” [36]. RT-ohjekortissa käsitellään muun muassa merkkiainetutkimuksessa tarvittavat laitteistot, merkkiainekokeen suorittaminen, materiaalien ja rakennetyyppien vaikutusmittausjärjestelyihin sekä mittauksen luotettavuuden arviointi.

RT-ohjekortin mukaisella merkkiainetutkimuksella tarkoitetaan tutkimusmenetelmää, jossa erityistä kaasua ja sitä havaitsevaa mittalaitetta apuna käyttäen selvitetään rakenteen sisällä ja rakenteen läpi tapahtuvia ilmavirtauksia. Merkkiainetutkimuksella voidaan havaita hyvinkin pieniä yksittäisiä ilmavuotoja, mutta havaintojen absoluuttisen vaikutuksen arvioiminen edellyttää yksittäisen havainnon arviointia suhteessa muihin

havaintoihin. Menetelmässä on suositeltavaa jakaa havainnot karkeasti pistemäisiin, vähäisiin ja voimakkaisiin vuotoihin. Havaintojen muodostamasta kokonaiskuvasta arvioidaan korjauksessa tarvittavia menetelmiä ja niiden laajuutta.

RT-ohjekortissa esitetään asetettavaksi tapauskohtaiset tavoitetasot rakenteiden ilma-vuotokorjausten ilmatiiviydelle. Esityksen mukaan tavoitetasoina voidaan käyttää seuraavia määritelmiä:

1. Täysin ilmatiivis, vuotoja ei sallita
2. Merkittävä ilmatiiviyden parantaminen, vähäisiä vuotoja sallitaan alipaineistettuna, ilmanvaihto tasapainotettuna alle -10 Pa
3. Ilmatiiviyden parantaminen, ei saa olla merkittäviä vuotoja alipaineistettuna, -10 Pa ja enintään vähäisiä vuotoja käyttötilanteessa, ilmanvaihto tasapainotettuna alle -5 Pa

Ohjeistuksena RT-ohjekortissa on, että ilmatiiviyden tavoitetason määrittelee kohteeseen päärakennesuunnittelija, tai tiiviyden suunnittelusta vastaava suunnittelija. Tavoitetaso on määriteltävä sen mukaan mitä ilmatiiviyden parantamisella tavoitellaan. Jos korjauksella halutaan estää esim. rakenteessa todennettujen mikrobien pääsy sisäilmaan, on tavoitetaso merkittävästi tiukempi tavanomaiseen ilmatiiviyden parantamiseen, eli tavoitetasoon 3 verrattuna. Jos rakenteissa ei esiinny terveydelle haitallisia epäpuhtauksia tai jos kyseessä on esim. pelkkä energiatalouden parantaminen tiivistämällä, voi tavoitetaso olla merkittävästi väljempi, eli tavoitetason 3 mukainen.

## **2.7 Betonirakenteiden ilmatiiviyteen liittyvien korjausten nykytila**

Käsiteltäessä betonirakenteiden sisäpuolista ilmatiiviyden parantamista, on termi tiivistyskorjaus ollut korjausten suunnittelussa ja toteutuksessa käytössä jo monta vuotta. Terminä tiivistyskorjaus on hyvin laaja käsite eikä sille ole määritelty spesifioitua työmenetelmää, materiaali- ja laatuvaatimusta tai soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin ja kohteisiin. Näiden tekijöiden vuoksi kyseisissä korjausratkaisuissa on hyvin paljon eroavaisuuksia laadullisesti. Esimerkiksi Rakennuslehden artikkelissa [38] tiivistyskorjausta on käsitelty väliaikaisratkaisuna, eikä menetelmälle ole artikkelin mukaan ennustettu pitkää käyttöikää.

Laineen vuonna 2014 tekemässä rakennusterveysasiantuntijan henkilösertifiointiin valmentavan koulutuksen opinnäytetyössä [1] käsiteltiin muun muassa rakenteiden ilmatiiviyteen liittyviä korjauksia osana sisäilmakorjauksia. Työssä todettiin, että 2000-luvulla rakenteiden sisäpintojen ilmatiiviyden parantamiseen liittyviä korjauksia on tehty Suomessa jo sadoissa sisäilmaongelmakohteissa monien tahojen toimesta. Korjauksissa käytetyt materiaalit, toteutus työmaalla ja laadunvarmistusmenettely ovat alkaneet vaikiintua. Huomionarvoista oli kuitenkin opinnäytetyössä esitetty toteamus, että korjauk-

set ovat kuitenkin voineet epäonnistua rakenteissa tapahtuvien ilmiöiden ja kokonaisuuden ymmärtämättömyyden, puutteellisten suunnitelmien, huolimattoman toteutuksen tai laadunvarmistuksen puuttumisen vuoksi. Lisäksi korjausmenetelmiä on saatettu käyttää sellaisiin rakenteisiin, joihin menetelmä ei sovellu.

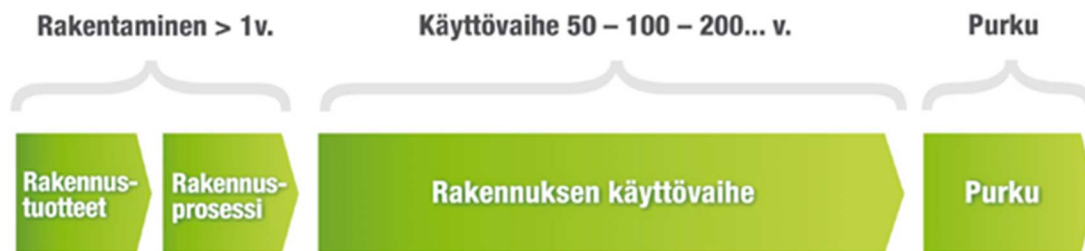
Syksyllä 2015 valmistuneessa Aalto-yliopiston diplomityössä [39] käsitellään toteutustavan vaikutusta ulkovaipparakenteen sisäpinnan ilmapuototiivistysten pysyvyyteen. Diplomityön tutkimusaineisto koostui seitsemään eri rakennukseen tehtyjen rakenneliit-  
tymien tiivistyksien tutkimuksista rakenneavauksin ja merkkiainekokein. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että kaikki oikein tehdyt pinnoitukset olivat tiiviitä ja lujasti kiinni alustassaan, kun taas väärin tehdyt olivat irtoilleet tai vuotivat muista syistä. Merkkiainekokeella todetut epätiivit korjaukset johtuivat pääosin tiivistysmateriaalin irtoamisesta alustastaan sekä tiivistysmateriaalin asentamisesta sellaiseen rakennepintaan, jossa ilmapuodot olivat mahdollisia tiivistysmateriaalin ympärillä. Työn johtopäätöksenä todettiin, että alustan käsittelyllä on suuri merkitys sille, miten hyvin tiivistysmateriaali kiinnittyy alustaan. Tutkimuksen mukaan paras tartunta alustaan saavutetaan, kun tiivistysmateriaalien asennuksessa noudatetaan tiivistysmateriaalivalmistajan ohjeita.

Rakenteiden ilmatiiviyteen liittyvien korjausten asennusten vaihteleva laatu sekä asentajien koulutustarve on havaittu yleisesti. Useat materiaalitoimittajat ovat aloittaneet omien järjestelmiensä koulutukset, joissa ohjeistetaan oikeat työmenetelmät. Koulutusten suorittaminen on jo joidenkin tilaajien toimesta asetettu vaatimukseksi korjaustyötä suorittavalle henkilölle.

Riittämättömään tiivistysjärjestelmien hallintaan on herätty myös kansallisella tasolla. Syksyllä 2015 on aloitettu Amiedu aikuiskoulutusoppilaitoksen, RATEKO:n sekä eri yhteistyötahojen yhdessä järjestämä VTT:n Rakenteiden tiivistäjä – henkilösertifiointiin valmentava koulutus, jonka tarkoituksena on pätevöittää henkilö tekemään vuotaviin rakenteisiin luotettavia rakenteiden tiivistystöitä.

## **2.8 Rakennusten elinkaari ja betonirakenteiden tekninen käyttöikä**

Rakennuksen elinkaarella tarkoitetaan yleisesti ajanjaksoa maankäytön ja rakentamisen suunnittelusta ja raaka-aineiden hankinnasta rakentamiseen ja aina rakennuksen purkuun ja purkutuotteiden lajitteluun saakka. Yleisellä jaottelulla rakennuksen elinkaari voidaan jakaa seuraavan kuvan (Kuva 5) mukaisesti kolmeen eri elinkaaren vaiheeseen, rakentamiseen, käyttövaiheeseen ja purkamiseen. Rakennuksen käyttövaiheen elinkaareen liittyy useita eri tekijöitä, kuten rakennuksen ylläpito ja käyttö, huolto, rakennuksessa käytetyt materiaalit sekä tehdyt vuosi- ja peruskorjaukset [40].



**Kuva 5.** Rakennuksen elinkaari vaiheittain [40].

Rakenteiden ja niissä käytettyjen materiaalien pitkäaikaiskestävyys, hoidettavuus ja huollettavuus ovat tärkeitä valintakriteerejä uudisrakentamisen suunnitteluvaiheessa, jotta rakennuksen ominaisuudet säilyvät koko tavoitellun käyttöiän ajan tai vähintään rakennusosin teknisen käyttöiän ajan. Rakennuksen käyttövaiheen aikaisessa korjausrakentamisessa tulee myös lisäksi huomioida rakennuksen tavoiteltu käyttöikä. Liian kevyt korjaus voi synnyttää ylimääräisiä korjauskertoja ja korjauskustannus voi moninkertaistua rakennuksen käyttövaiheen aikana. Liian raskas korjaus rakennuksen käyttövaiheen loppupuolella voi taas aiheuttaa turhia kustannuksia lyhyen käyttöajan vuoksi, jolloin raskaan korjauksen mahdollistamat ylläpito- ja korjauskustannusten säästöt rakennuksen käyttövaiheen aikana eivät ehdi realisoitua.

Sisäilmakorjauksissa valitun korjausasteen ja -menetelmän sekä tavoitellun rakennuksen käyttöiän merkitys on monimuotoisempi. Korjausaste ja -menetelmä voi olla riittämätön korjaukseen valittujen materiaalien pitkäaikaiskestävyyden, hoidettavuuden ja huollettavuuden näkökulmasta rakennuksen jäljellä olevaan käyttöikään nähden. Suuri korjausaste, kuten rakenteita purkava/uusiva korjausmenetelmä voi synnyttää ongelmia rakennuksen elinkaaren myöhemmässä vaiheessa esimerkiksi korjattujen rakenteiden muodonmuutosten vuoksi ja tavoiteltu sisäilman laadun parantuminen voi jäädä lyhytaikaiseksi hyödyksi.

RT-ohjekortin ”*Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot*” [33] mukaan rakenteita ja rakennusosia käsiteltäessä tekninen käyttöikä tarkoittaa käyttöönoton jälkeistä aikaa, jona rakenteiden ja rakennusosien tekniset toimivuusvaatimukset täyttyvät. Teknisen käyttöiän saavuttaminen edellyttää RT-ohjekortin mukaan, että rakenteet ja rakennusosat ovat suunniteltu ja toteutettu rakennusajankohtana voimassa olevien määräyksien ja ohjeiden mukaisesti. Lisäksi edellytetään, että rakentamisessa on noudatettu hyvää rakennustapaa, asianmukaiset kunnossapito-, hoito- ja huoltotoimenpiteet on tehty ja käyttöohjeita on noudatettu. Betonirakenteille ilmoitettujen keskimääräisten teknisten käyttöikien vaihteluväli on 30–80 vuotta, eikä betonille ole asetettu yksittäistä käyttöikää.

Betoniteollisuus ry:n verkkosivuston [41] mukaan betonin käyttöikään vaikuttavat betonin lujuusluokka, vesi-sideainesusuhde, sementin määrä ja laatu, betonin lisäaineistus,

raudoituksen betonipeitteen paksuus, raudoitteen laatu sekä ulkoinen rasitus. Betonin tavoitelluksi käyttöäksi valitaan suunnittelussa yleensä 50 vuotta, mutta rakenteet voidaan suunnitella jopa 200 vuoden käyttöäälle. Betoniteollisuus ry:n mukaan sisätiloissa betonirakenteet ovat periaatteessa ikuisia, sillä ei ole mitään vauriomekanismia, joka vahingoittaisi betonia normaaleissa sisätiloissa. Betonirakenteiden käyttöäksi sisätiloissa voidaankin olettaa 200 vuotta.

## 3. BETONIRAKENTEIDEN LIITTYYMIEN EPÄPUHTAUSVIRTAUSTEN LASKENTAMALLI

### 3.1 Yleistä

Excel-ohjelmalla luotiin yksinkertainen laskentamalli, jonka avulla arvioitiin huonetilaan betonirakenteiden liittymissä olevien rakojen kautta kulkevia ilmamääriä sekä ilman mukana kulkevia epäpuhtauksia. Laskentamalli perustui yksinkertaiseen geometriaan ja laskennassa käytettiin eriarvoisia muuttujia sekä raja-arvoiksi asetettuja vakioita, jotka perustuivat tunnetun vaihteluvälin arvoihin.

### 3.2 Laskentamallin lähtöarvot

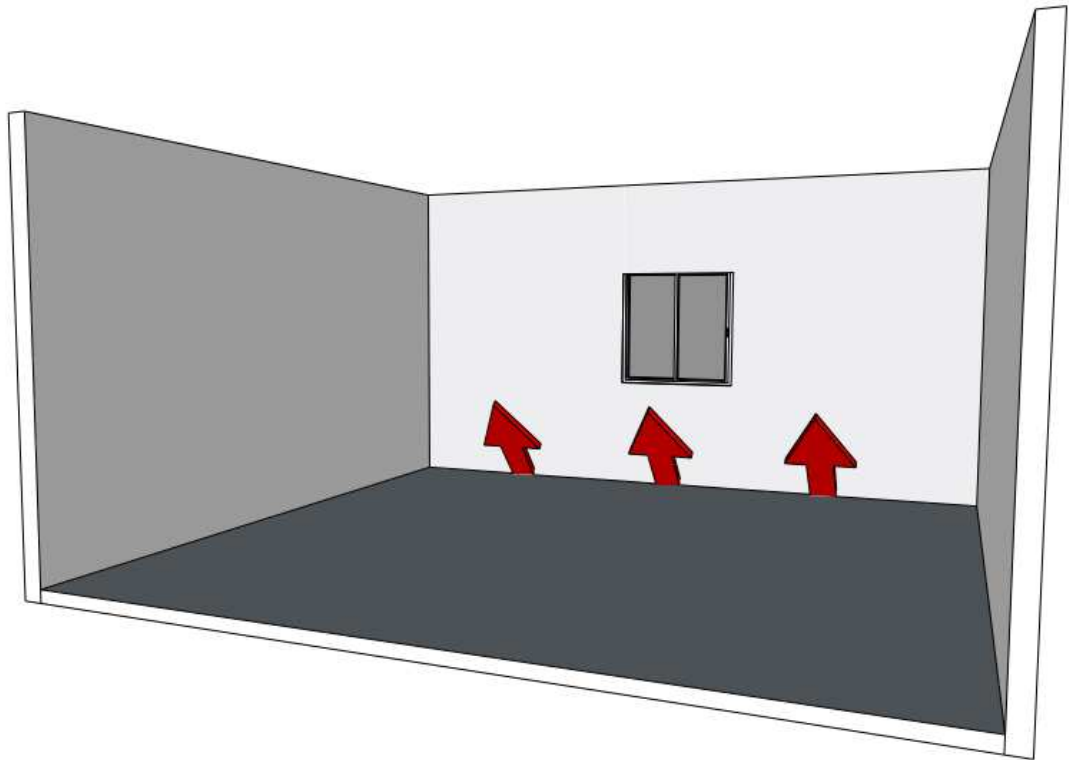
Laskentamallissa käytetyt lähtöarvot rajattiin tilan, alapohjarakenteiden sekä tilan ilmatilavuuden vaatimalla ilmanvaihdon mitoituksella. Laskennassa käytetyksi mallitilaksi valittiin yhden henkilön toimistohuone, jonka ilmatilavuus on  $70 \text{ m}^3$ . Tilan mitoitus perustui *RT 95–11151 Toimistotilat, yleiset suunnitteluperusteet* – ohjekortin [42] suositukseen toimistotilan vähimmäistilantarpeesta. Alapohjarakenteiden mitoitusarvot perustuivat vuoden 1991 RT-ohjekortin [43] mukaisiin rakennepoikkileikkauksiin sekä betonin laskennalliseen keskimääräiseen pitkäaikaiskutistumaan. Ilmanvaihtuvuuden osalta tilan laskentamalli perustui voimassaolevan *RakMk D2* [44] vähimmäisvaatimuksiin.

#### 3.2.1 Tilan mitoitusarvot

- Huoneen pinta-ala  $25 \text{ m}^2$  (5 x 5 metriä)
- Huonekorkeus 2,8 metriä
- Huonetilavuus  $70 \text{ m}^3$
- Kaikki tilapinnat betonirakenteita

Seuraavassa kuvassa (Kuva 6) on esitetty laskentamallissa käytetyn tilan periaatepiirros.



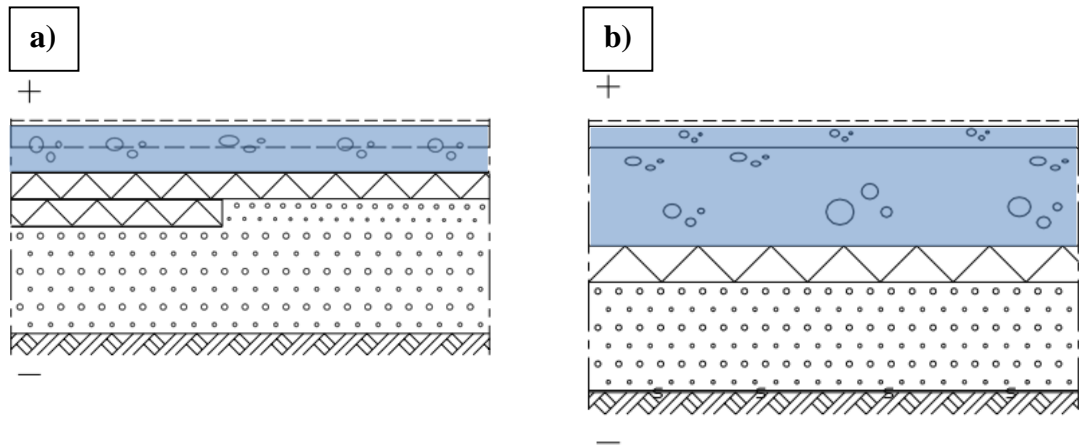


**Kuva 6.** Kuvassa on esitetty laskentamallissa käytetyn tilan periaatepiirros. Kuvassa esitetyt punaiset nuolet esittävät laskentamallissa käsiteltävästä rakenneliittymästä tulevia ilmavuotoja.

### 3.2.2 Alapohjarakenteen mitoitusarvot

- Laskennassa käytettyjen betonirakenteiden paksuudeksi valittiin kahden eri alapohjarakennetyypin mukaiset 80 mm (AP 205) ja 170 mm (AP 201).
- Betonin raot oletettiin syntyvän betonin pitkäaikaiskutistuman kautta, joka laskennassa oletettiin olevan keskimääräinen 0,5 mm/m. Varhaisvaiheen kutistuman oletettiin olevan 0.

Seuraavissa kuvissa (Kuvat 7 a ja b) on esitetty laskennassa alapohjarakenteita käytetyt rakennetyypit.



**Kuvat 7 a ja b.** Kuvassa a on esitetty rakennetyyppi AP 205 ja kuvassa b AP 201[43]. Laskennassa huomiodut rakenneosat ovat esitetty kuvissa sinisellä tehostusvärillä.

Alapohjarakenteen paksuudessa on huomioitu vain betonilaatan osuus, koska betonilaatan alapuolisen eristekerroksen on oletettu olevan sokkelirakennetta vasten epätiivimpi kuin betonilaatan ja sokkelin välisen liitoksen. Betonilaatan alapuolisen maatyön mahdollistamaa ilman virtaamaa ei huomioitu, mutta maa-aineksen mahdollistaman ilman virtaaman oletettiin olevan suurempi tai vähintään samansuuruinen kuin rakenne-liittymän mahdollistaman ilman virtaaman. Betonilaatan reuna-alueille kutistuman aiheuttamien rakojen läpi kulkevaan ilmavirtaukseen vaikuttaa oleellisesti ilman viskositeetti, raon pinta-ala, rakenteen paksuus ja näiden vaikutuksista syntyvä raon kyky vastustaa ilmavirtausta sekä yleisesti paine-ero tarkasteltavan rakenneosan yli.

### 3.2.3 Ilmanvaihdon ja rakennuksen painesuhteiden oletusarvot

- Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä
- Huonekohtaisen ilmavirran hyväksytty poikkeama 20 %, tulo- ja poistoilman suhde 0,8 (tila alipaineinen ilmanvaihdon suunnitteluperusteiden mukaisesti)
- Ilmanvaihdon käyttöaika arkisin klo 06:00-18:00
- Tilan vaadittu ulkoilmavirta käyttöaikana  $1,5 \text{ l/s/m}^2$  ilmanvaihtokertoimen ollessa 2 1/h.
- Tilan vaadittu ulkoilmavirta käyttöajan ulkopuolella  $0,15 \text{ l/s}$  ilmanvaihtokertoimen ollessa 0,2 1/h. Tilassa on tällöin käytössä pelkästään poistoilmanvaihto.
- Laskennassa betonirakenteen yli olevan paine-eron oletettiin olevan 5 Pa ja säilyvän vakiona tulo- ja poistoilmamäärien muutoksista huolimatta.

Kun ilmanvaihdon mitoituksessa käytetään esitettyjä oletusarvoja, on ilmanvaihdon alipaineisuudesta johtuva vuotoilman tarve ilmanvaihdon päiväkäyttöaikana kaksinkertainen verrattuna käyttöajan ulkopuoliseen ilmanvaihdon käyttöön. Huonekohtaisen ilmavirran poikkeaman ollessa 10 % (tulo- ja poistoilman suhde 0,9), on vuotoilman tarve vakio koko vuorokauden ajan.

### 3.2.4 Ilman mukana liikkuvien sieni-itiöpitoisuuksien raja-arvot laskennassa

Tutkimustietoa rakenteista ilmanäytteenottomenetelmällä mitatuista epäpuhtauspitoisuuksista on yleisesti hyvin vähän. Tässä tutkimuksessa käytetyt rakenteiden epäpuhtauspitoisuudet, eli epäpuhtauslähteen konsentraatioiden raja-arvot perustuivat kahteen eri oletukseen, jotka olivat seuraavia:

- Ensimmäisessä oletuksessa laskennassa käytetyt raja-arvot perustuivat betonirakenteiden eristetilasta impaktorilla mitattuihin [11] sieni-itiöiden kokonaispitoisuuksiin. Epäpuhtauslähteen konsentraatioiden raja-arvoiksi määriteltiin tutkimustulosten perusteella 200 ja 600 pmy/m<sup>3</sup>.
- Toisessa oletuksessa laskennassa käytetty raja-arvo perustui ryömintätiloista impaktorilla mitattuihin sieni-itiöiden pitoisuuksiin [13] sekä mikrobivaurioituneista rakennuksista purkutöiden aikana mitattuihin sieni-itiöpitoisuuksiin sisäilmassa [14]. Epäpuhtauslähteen konsentraation raja-arvoksi määriteltiin tutkimustulosten perusteella vaihteluvälin korkeimpien arvojen mukaisesti 20000 pmy/m<sup>3</sup>.

## 3.3 Laskentamalli ja -kaavat

Laskelmissa on esitetty maksimiepäpuhtauspitoisuudet mitä kyseisten vuotoreittien kautta sisäilmaan voi siirtyä ilmanvaihdon toiminta huomioon otettuna. Laskelmissa ei ole otettu huomioon muiden mahdollisten vuotoreittien osuutta.

### 3.3.1 Raon pinta-ala

Laskentamallin luonti aloitettiin määrittelemällä betonin liittymien pitkäaikaiskutistuman aiheuttama raon pinta-ala, jota kautta ilmavirtaus liikkuu sekä ilmanvaihdon asettamat vuotoilmarajat laskennalle. Laskenta perustui kohdassa 3.2 esitettyihin mitoitus- ja oletusarvoihin. Osassa laskelmista raon leveyden ja pituuden osuutta rakenneliittymässä muutettiin simuloimaan raon mahdollistaman ilman virtaaman, tilaan syntyvän epäpuhtauspitoisuuden sekä epätiivien tiivistyksen vaikutuksia.

Alapohjarakenteen osalta betonin liittymiin muodostuvat raot laskettiin betonin pitkäaikaiskutistuman ja betonilaatan mittojen perusteella. Betonilaatan pituus laskennassa oli 1 metri tai 5 metriä. Tilan väliseinien kohdalla betonilaatan oletettiin jatkuvan muihin tiloihin. Raon pinta-ala laskettiin yhdelle ulkoseinälinjalle kaavan (1) mukaisesti:

$$A = \frac{\frac{\text{betonin kutistuma (mm/m)}}{1000} \cdot \text{betonin pituus (m)}}{2} \cdot \text{raon pituus (m)} \quad (1)$$

### 3.3.2 Ilman tilavuusvirta raossa

Betonin rakojen mitoituksen jälkeen laskettiin rakojen kautta sisäilmaan siirtyvän vuotoilman simuloimiseksi ilman tilavuusvirta  $R_a$  raon läpi, jossa huomioitiin raon sisäosan sekä raon alku- ja loppupään ilmanvastukset. Tilavuusvirta ratkaistiin seuraavalla yhtälöllä [45], joka on esitetty kaavassa (2):

$$R_a = \frac{1}{2S_{R,p}} \cdot \left( \sqrt{(S_g'')^2 + 4\Delta p S_{R,p}} - S_g'' \right) \quad (2)$$

Missä:

$$S_g'' = \frac{12\eta_a L}{b^2 A} \text{ , raon sisäosan ilmanvastus neliötä kohti [s} \cdot \text{Pa / m}^3\text{]}$$

$$S_{R,p} = \frac{\xi \rho_a}{2A^2} \text{ , raon alku- ja loppupään ilmanvastus [Pa / (m}^3\text{ / s)}^2\text{]}$$

$\eta_a$  = ilman dynaaminen viskositeetti 10 °C [N · s / m<sup>2</sup>]

$L$  = pituus rakenteen läpi [m]

$b$  = raon leveys [m]

$A$  = raon pinta-ala [m<sup>2</sup>]

$\xi$  = raon alku- ja loppupään ilmanvastuksien aiheuttamaa yhdistettyä painehäviötä vastaava häviökerroin 1,8

$\rho_a$  = ilman tiheys 10 °C, 50 %RH [kg / m<sup>3</sup>]

$\Delta p$  = paine-ero raon yli [Pa]

### 3.3.3 Ilmavirtauksen tyyppi

Ilman tilavuusvirran ratkaisun jälkeen ilmavirtauksen tyyppi selvitettiin laskemalla virtaukselle Reynoldsin luku,  $Re$ . Ilmavirtauksen tyyppi jakautuu kahteen ryhmään, laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen. Ilmavirtaus on laminaarista, kun  $Re$  on <2000 ja selvästi turbulenttista jos  $Re$  on >3500. Laminaarisessa virtauksessa ilma liikkuu tasaisissa kerroksissa eikä ilma sekoitu virtauskohdassa. Turbulentissa virtauksessa ilma liikkuu epätasaisesti ja virtaava ilma sekoittuu [46]. Reynoldsin luku ratkaistiin seuraavalla kaavan (3) mukaisella yhtälöllä:

$$Re = \frac{2R_a b \rho_a}{\eta_a A} \quad (3)$$

Kaikilla laskennassa käytetyillä muuttujilla ja raja-arvoilla ilmavirtauksen tyyppi pysyi selvästi laminaarisena.

### 3.3.4 Sekoitussyhtälö ja epäpuhtaustuotto

Ilman virtauksen tyypin ja ilman tilavuusvirran ratkaisun jälkeen laskettiin sekoitusyhtälöä [47] soveltamalla kuinka paljon sisäilmaan siirtyy rakojen kautta epäpuhtauksia, kun

rakojen kautta liikkuvat ilmamäärät, rakenteessa olevat epäpuhtauksien raja-arvot, ilmanvaihdon toiminta ja tutkittavan rakenteen yli olevat keskimääräiset paine-erot tunnettiin. Laskentaolettamuksena sieni-itiöpitoisuuksien oletettiin jakautuvat tasaisesti virtaavaan ilmaan, mahdollista painovoiman vaikutusta mikrobien liikkeeseen tai mikrobien impaktiota ja mahdollista uudelleentarttumista ilmaan ei otettu huomioon. Sekoitussyhtälön periaatteilla sisätilaan syntyvät epäpuhtauspitoisuudet ratkaistiin seuraavalla kaavalla (4):

$$K_s = K_u + \frac{G}{nV} \cdot (1 - e^{-nt}) + (K_{s0} - K_u) \cdot e^{-nt} \quad (4)$$

Missä:

$K_s$  = sisäilman konsentraatio [pmy / m<sup>3</sup>]

$K_u$  = ulkoilman konsentraatio [pmy / m<sup>3</sup>]

$G$  = epäpuhtaustuotto [pmy / h]

$n$  = ilmanvaihtokerroin [1 / h]

$V$  = tarkasteltavan tilan tilavuus [m<sup>3</sup>]

$t$  = aika [h]

$K_{s0}$  = sisäilman alkukonsentraatio [pmy / m<sup>3</sup>]

Yhtälössä ulkoilman konsentraation oletettiin olevan 0, koska arvioitavana oli vain rakenteen epäpuhtaustuotto  $G$ . Ulkoilman konsentraatio vaikuttaa kaavassa suoraan epäpuhtaustuottoa kasvattamalla konsentraation verran. Epäpuhtaustuotto laskettiin seuraavalla kaavalla (5):

$$G = \text{epäpuhtauslähteen konsentraatio} \left( \frac{\text{pmy}}{\text{m}^3} \right) \cdot \text{ilman tilavuusvirta raossa} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (5)$$

### 3.3.5 Ilmanvaihdon vaikutus

Ilmanvaihto asettaa ns. raja-arvon mahdollisille rakenteiden läpi siirtyville ilmavirtauksille. Jos ilmanvaihdon ulkoilma- ja poistoilmavirta ovat tasapainossa, ei ilmanvaihdon vaikutuksesta synny paine-eroa, joka mahdollistaisi vuotoilmavirtaukset rakenteiden läpi. Ilmanvaihdon tarvitsema vuotoilmamäärä  $q$  (m<sup>3</sup>/h) laskettiin seuraavasti kaavalla (6):

$$q = \frac{\left( \text{sallittu poikkeama}(\%) \cdot \text{ulkoilmavirta} \left( \frac{\text{l/s}}{\text{m}^2} \right) \right) \cdot 3600}{1000} \cdot \text{tilan pinta-ala} (\text{m}^2) \quad (6)$$

Tietyillä laskenta-arvoilla ilman tilavuusvirta raossa ylitti ilmanvaihdon tarvitseman vuotoilmamäärän, eli rakenteen rakojen läpi oli mahdollista vuotaa enemmän ilmaa, kuin ilmanvaihdon vaikutuksesta sitä tilasta poistui. Tällöin epäpuhtaustuoton laskennassa huomioitiin ainoastaan ilmanvaihdon tarvitsema vuotoilmamäärä (m<sup>3</sup>/h).

Kun sisäilman konsentraatio tunnettiin aikana  $t$ , laskettiin sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kehittyminen neljän ja puolen vuorokauden ajanjaksolle eri epäpuhtauslähteen konsentraatioilla. Tarkasteltavana ajanjaksona oli torstai klo 06:00 – maanantai klo 18:00. Ilmanvaihdon ilmamäärät asetettiin vastaamaan tilan käyttötilanteiden mukaisia vaadittuja vähimmäisilmamääriä. Arkipäivinä tilan käyttöajaksi asetettiin klo 06:00–18:00. Viikonloppuna tiloja ei käytetty.

### 3.3.6 Ilmavuotoluvun mukainen vuotoilmavirta

Jos rakennuksen ilmanvuotoluku  $q_{50}$  tunnetaan, niin rakenteiden läpi liikkuvan keskimääräisen vuotoilmavirran ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) voi laskea Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 mukaisella kaavalla (7):

$$q_{v,\text{vuotoilma}} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} \cdot A_{\text{vaippa}} \quad (7)$$

$q_{50}$  = rakennusvaipan ilmanvuotoluku  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$

$A_{\text{vaippa}}$  = rakennusvaipan pinta-ala  $\text{m}^2$

$x$  = kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille sekä korkeimmille rakennuksille 15

3600 = kerroin, joka muuttaa ilmavirran  $\text{m}^3/\text{h}$  yksiköstä  $\text{m}^3/\text{s}$  yksikköön

Kun yksikerroksisen rakennuksen ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  oletetaan olevan  $4 \text{ l/h}$ , niin laskentamallin mukaisen tilan vuotoilmavirta on  $12,1 \text{ m}^3/\text{h}$ . Tällöin  $5 \text{ Pa}$ :n paine-erolla rakennetyypin AP201 osuus kokonaisvuotoilmavirrasta on noin 40 % ja rakennetyypin AP205 on noin 83 %.

### 3.3.7 Ilman tilavuusvirran arvioiminen maa-aineksissa

Maa-aineksen ilmanläpäisevyyden mahdollistama ilman tilavuusvirta  $Ra$  voidaan arvioida seuraavalla kaavalla (8) tietyllä tilavuudelle:

$$Ra = \frac{A \cdot K \cdot \Delta p}{\eta_a \cdot L} \quad (8)$$

Missä:

$A$  = Maa-aineksen pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$K$  = Maa-aineksen ohjeellinen läpäisevyysarvo

$\Delta p$  = paine-ero raon yli [ $\text{Pa}$ ]

$\eta_a$  = ilman dynaaminen viskositeetti  $10^\circ\text{C}$  [ $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ ]

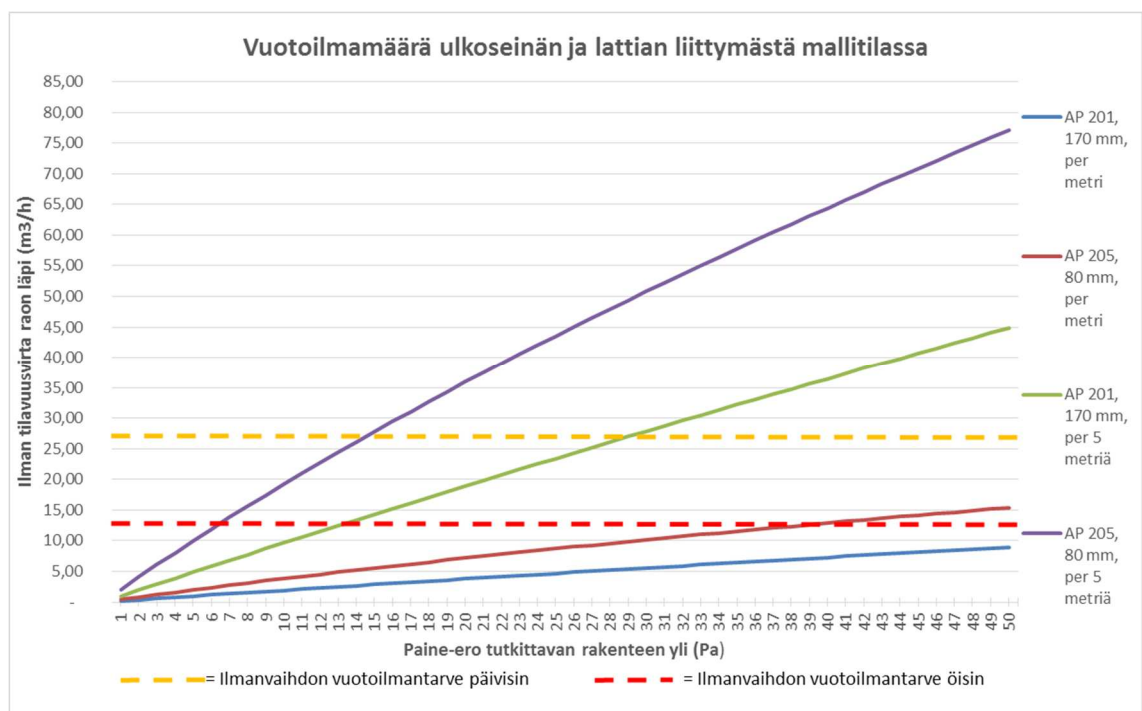
$L$  = pituus maa-aineksen läpi [ $\text{m}$ ]

### 3.4 Laskentamallin tulokset

Laskentamallista saatujen tuloksien analyysit perustuivat oletuksiin, joissa rakojen geometria on säännöllistä ja rakojen sisäpinnat ovat sileitä. Ilmavirtaus pysyy tällöin laminaarisena, koska raossa liikkuva ilmavirta ei joudu väistämään esteitä suorassa geometriassa ja ilmanvastus on pienimmillään, koska raon sisäpintojen sileys minimoi pintojen ja ilman välisen vuorovaikutuksen. Laskentamallin tuloksina saadut ilmavirtaukset kuvaavat siis oletusarvojen mahdollistamia suurimpia virtausmääriä.

#### 3.4.1 Ilman tilavuusvirran maksimiarvoja mallirakenteilla

Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 8) on esitetty ne vuotoilmamäärät ilman tilavuusvirran maksimiarvoina, jotka laskentamallin mukaisilla raja-arvoilla voivat enimmillään syntyä.

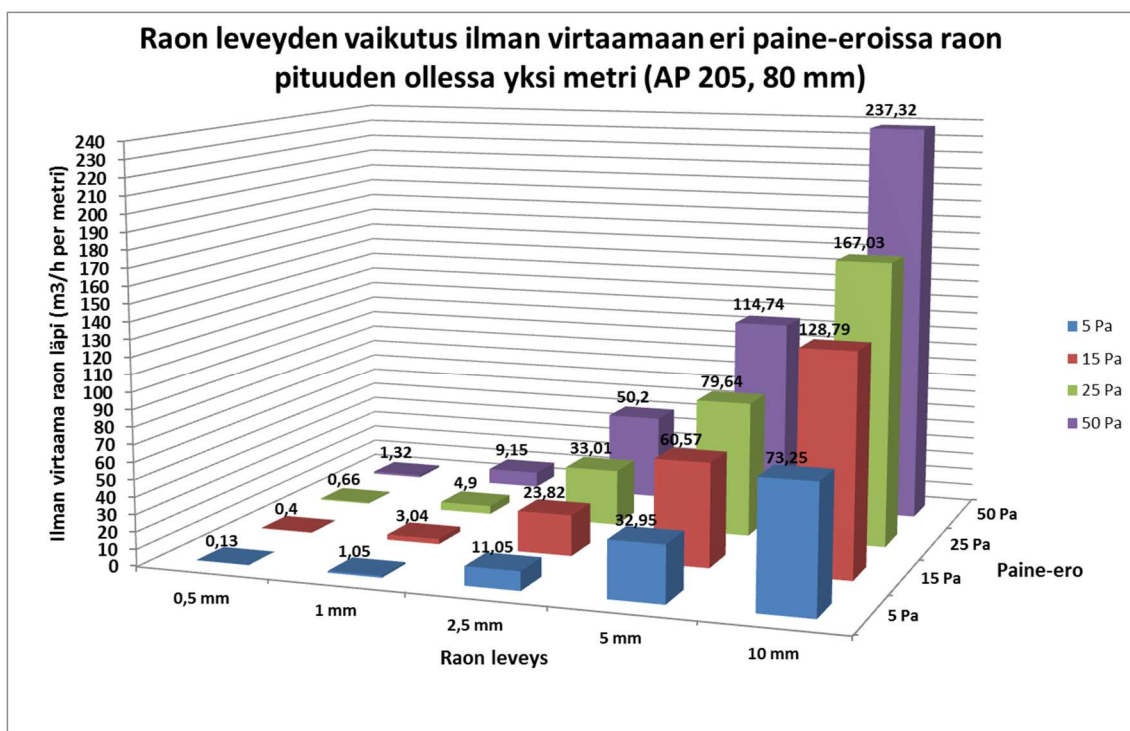


**Kuva 8.** Kuvaajassa on esitetty ilman tilavuusvirran kasvaminen paine-eron vaikutuksesta mallitilassa alapohjan ja ulkoseinän liittymän välisestä raosta laskentamallin mukaisilla lähtöarvoilla, kun vuotokohdassa olevan raon leveys on 1,25 mm ja rakenteen sisäpinnan suuntainen raon pituus on yksi metri tai viisi metriä. Katkoviivat esittävät laskentamallin mukaisen ilmanvaihdon vuotoilmantarpeet käyttöaikana ( $27 \text{ m}^3/\text{h}$  päivisin) sekä käyttöajan ulkopuolella ( $13,5 \text{ m}^3/\text{h}$  öisin).

Edellisessä kuvaajassa (Kuva 8) esitetyt ilmanvaihdon vuotoilmantarpeet asettavat rajan esitettyjen rakennetyyppien rakojen vuotoilmamäärille, kun kyseessä on tilan mitoituksen mukainen viiden metrin raon pituus rakenteen sisäpinnan suunnassa. Kuvaajan mukaisesti rakennetyyppi AP 205 saavuttaa päivisin lähtöarvojen mukaisen maksimivuotoilmamäärän noin 15 Pa:n ja rakennetyyppi AP 201 noin 29 Pa:n alipaineisuudessa

sisäilmaan nähden. Öisin maksimivuotoilmamäärä rakennetyypissä AP 205 saavutetaan jo noin 6 Pa:n ja rakennetyypissä AP 201 noin 13 Pa:n alipaineisuudessa tutkittuun rakenteeseen nähden. Vertailuarvoina rakenteen sisäpinnan suuntaiselle yhden metrin raon pituudelle lasketut maksimivuotoilmamäärät voidaan saavuttaa vain hyvin suurissa tutkittavan rakenteen yli olevissa paine-eroissa.

Ilman tilavuusvirta raon läpi kasvaa samassa suhteessa raon pinta-alaan nähden, kun raon leveys pysyy vakiona ja raon pituus kaksinkertaistuu, paine-ero tutkittavan rakenteen yli pysyy vakiona ja kyseessä on laminaarinen suora virtaus. Kun tilan alapohjarakenteen pinnan suuntainen raon pituus kaksinkertaistuu, niin myös ilman tilavuusvirta raon läpi kaksinkertaistuu, koska ilman tilavuusvirta on laskennallisesti suorassa suhteessa raon pituuteen. Rakenteessa AP 205 olevan raon leveyden vaikutusta raon läpi liikkuvaan ilman virtaamaan eri paine-eroissa on esitetty seuraavassa kuvaajassa (Kuva 9).



**Kuva 9.** Kuvaajassa on esitetty rakenteessa AP 205 olevan raon leveyden vaikutus ilman virtaamaan eri paine-eroissa, kun rakenteen sisäpinnan suuntainen raon pituus on 1 metri.

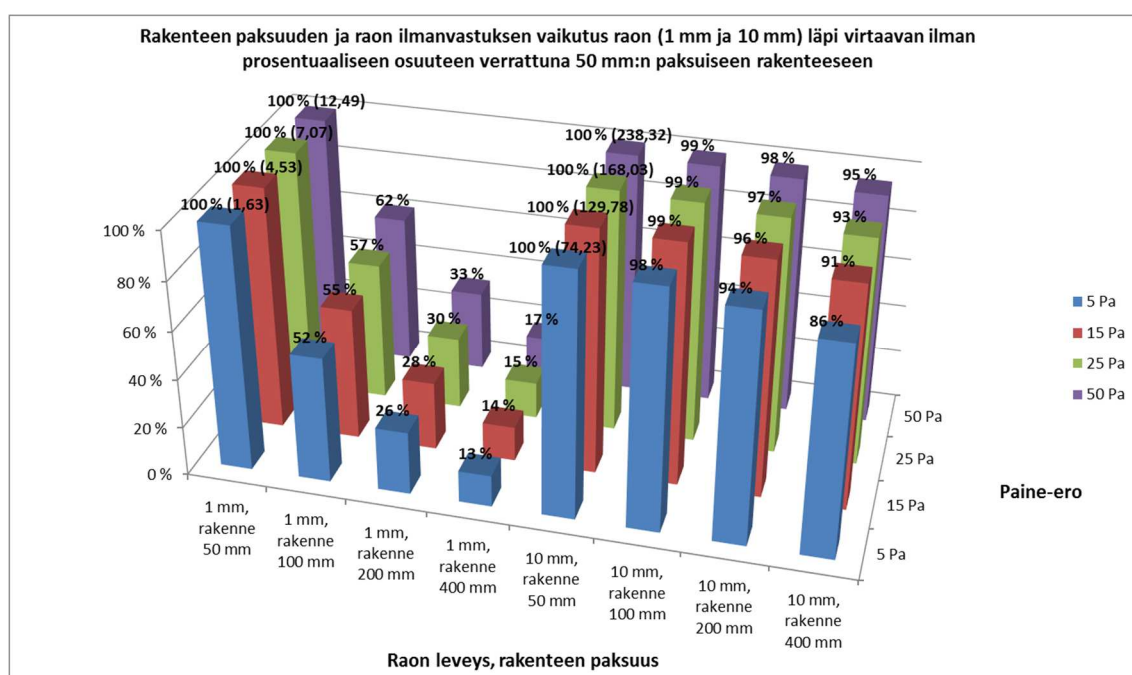
Edellisessä kuvaajassa (Kuva 9) esitetyt ilman virtaamat mallirakenteessa olevan raon läpi kasvavat huomattavasti, kun raon leveys sekä paine-ero tutkitun rakenteen yli kasvavat. Pienimmässä 0,5 mm:n raossa rakennuksen normaaleissa painesuhteissa (5 Pa) ilman virtaama 1 metrin pituiselle raolle on 0,13 m<sup>3</sup>/h, jolloin rakenteessa olevan raon mahdollistama vuotoilmamäärä on mallitilassa 5 metrin pituisella raolla 0,65 m<sup>3</sup>/h. Kun raon mahdollistaman vuotoilmamäärän jakaa rakennuksen käyttöajan aikaisella ilmanvaihdon vuotoilmantarpeella (27 m<sup>3</sup>/h), on kyseisen raon mahdollistama vuotoilman osuus vain 2,4 % kokonaisvuotoilmavirrasta.



### 3.4.2 Rakenteen paksuuden ja raon ilmanvastuksen vaikutus raon läpi virtaavaan ilmamäärään

Raon leveydestä riippuvalla ilmanvastuksella on suuri vaikutus raon läpi virtaamaan ilmamäärään. Mitä suuremmaksi rako muodostuu, sitä pienempi ilmanvastus raolla on. Leveydeltään pienissä raoissa rakenteen paksuuden merkitys kasvaa, koska ilmanvastus kasvaa, joka taas rajoittaa tiettyssä paine-erossa liikkuvaan ilmamäärään.

Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 10) on esitetty rakenteen paksuuden ja kahden erilevyisen raon (1 mm ja 10 mm) muodostaman ilmanvastuksen vaikutus raon läpi. Kuvaajassa ilman virtaamaa on verrattu prosentuaalisesti molemmissa rakoleveyksissä esimerkkirakenteista parhaiten virtaavaan 50 mm:n paksuiseen rakenteeseen.



**Kuva 10.** Kuvaajassa on esitetty rakenteen paksuuden ja raon leveyden muodostaman ilmanvastuksen vaikutus rakojen (1 mm ja 10 mm) läpi. Laskennassa käytetty rakenteen sisäpinnan suuntainen raon pituus on 1 metri.

Kuvaajan (Kuva 10) perusteella raon leveydellä voidaan osoittaa olevan suuri merkitys raon läpi virtaavaan ilmamäärään eripaksuisilla rakenteilla. Kuvaajassa esitetyissä 1 mm:n raossa eri paine-eroissa ilmamäärien prosentuaalinen lasku on selvästi havaittavissa rakenteen paksuuden kasvaessa. Kun rakenteen paksuus kaksinkertaistuu, niin raon läpi virtaava ilmamäärä lähes puolittuu. Kun raon läpi virtaavaa ilmamäärää tarkastellaan 10 mm:n levyisellä raolla, on ilmanvastuksen vaikutus kokonaisilmamäärään lähes olematon riippumatta rakenteen paksuudesta. Mitä suuremmissa paine-eroissa tarkastelua tehdään, sitä pienempi on eripituisten rakenteiden rakojen läpi kulkevien ilmamäärien välinen erotus prosentuaalisesti.

### 3.4.3 Ilmanvaihdon vuotoilmantarpeen merkitys painesuhteisiin ja rakenteiden ilmatiiviyyden parantamiseen

Pinta-alaltaan suurissa betonirakennekokonaisuuksissa, joissa mm. kutistuman aiheuttamat raot voivat olla suuria, merkittävin tekijä epäpuhtauksien kulkeutumisessa sisäilmaan on ilmanvaihdon vuotoilmantarve. Esimerkiksi pinta-alaltaan suuret betoniset alapohjarakenteet mahdollistavat betonin kutistumasta johtuen suurien rakojen syntymisen, joiden läpi voi liikkua suuriakin ilmamääriä. Tällöin normaaleissa käyttöolosuhteissa ilman tilavuusvirran raossa määrittää vain ilmanvaihdon vuotoilmantarve. Jos mallitilan ulkoseinän ja lattian liittymän ilmatiiviyttä parannetaan asteittain korjattavan rakenteen yli olevan paine-eron säilyessä samana (5 Pa), on ilman tilavuusvirta raossa suorassa suhteessa ilmanvaihdon tarvitsemaan vuotoilmamäärään, kun oletusarvona on, että kyseinen rakenneliittymä on tilan ainoa vuotokohta. Jotta paine-ero asteittaisessa korjauksessa säilyy samana ja vuotoilmamäärät vähenevät samassa suhteessa, on ilmanvaihdon sallittujen poikkeamien raja-arvojen oltava seuraavan taulukon (Taulukko 5) mukaiset:

**Taulukko 5.** Taulukossa on esitetty korjattavan rakenteen yli olevan paine-eron säilyttäminen samana laskentamallin mukaisen rakenneliittymän ilmatiiviyyden asteittaisessa parantamisessa ilmavirran sallittua poikkeamaa pienentämällä. Ilmavirran sallittu poikkeama on laskettu mitoittamalla ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmamäärän suhteen muodostama ilmanvaihdon tarvitsema vuotoilmamäärä 5 Pa:n paine-erossa raon läpi virtaavan ilmamäärän kokoiseksi.

Rakenneliittymän ilmatiiviyyden asteittainen parantaminen mallitilassa	Ohjeellinen ilmavirran sallittu poikkeama AP 205 / AP 201
0 %	8 % / 4 %
25 %	6 % / 3 %
50 %	4 % / 2 %
75 %	2 % / 1 %
100 %	0 % (jos ei ole, niin vuotoilma tulee siirtoilmana muista tiloista)

Kuten edellisestä taulukosta (Taulukko 5) voi todeta, tulee ilmavirran sallitun poikkeaman laskea prosentuaalisesti lähes saman verran, kuin rakenneliittymän ilmatiiviyttä parannetaan, jotta korjattavan rakenneliittymän yli oleva paine-ero säilyy samana ja

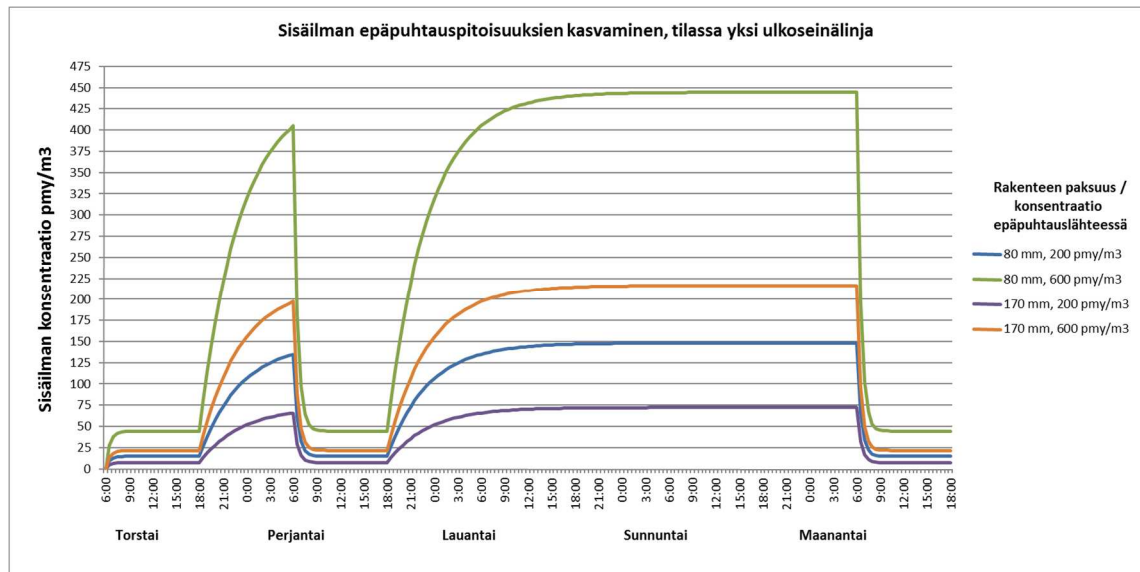
rakenneliittymästä tuleva vuotoilmamäärä vähenee ilmatiiviynen asteittaisen parantamisen mukaisessa suhteessa.

### 3.4.4 Ilmanvaihdon toiminnan vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin

Ilmanvaihdon toiminta vaikuttaa oleellisesti sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Laskentamallissa käytetyn koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon toimiessa rakennuksen käyttöaikana tilaan tuodaan ja tilasta poistetaan ilmaa koneellisesti. Rakennuksen käyttäjän ulkopuolella tilasta pelkästään poistetaan ilmaa koneellisesti.

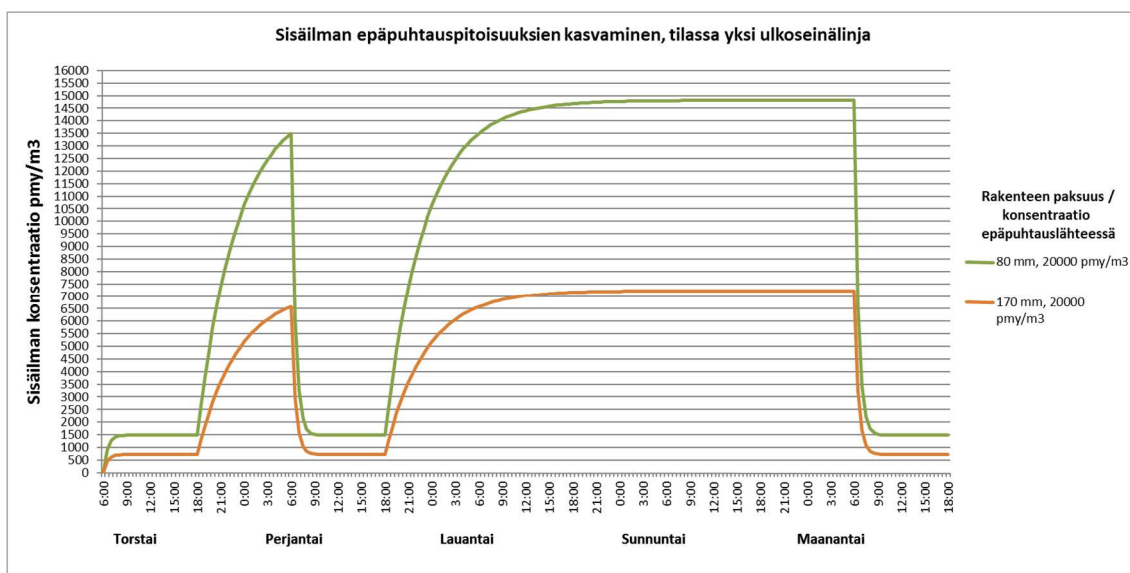
Laskentamallissa käytetyt epäpuhtausuotot on oletettu siirtyvän sisäilmaan yhdestä epäpuhtauslähteestä. Laskenta perustui 5 Pa:n paine-erossa raon kautta liikkuvaan ilmamäärään eripaksuisilla rakenteilla. Kyseisessä paine-erossa AP205 rakennetyypillä ilman virtaama oli 10 m<sup>3</sup>/h ja AP201 rakennetyypillä 4,9 m<sup>3</sup>/h. Ilmanvaihdon kokonaisvuotoilman tarpeen jäljelle jäävän osuuden on oletettu siirtyvän tilaan siirtoilmana.

Seuraavissa kuvissa (Kuva 11 ja Kuva 12) on esitetty sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen mallitilassa oletusarvojen mukaisilla epäpuhtauslähteiden konsentraatioilla, kun tilassa on laskentamallin mukainen yksi ulkoseinälinja.



**Kuva 11.** Kuvaajassa on esitetty sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen alapohjarakenteiden AP205 (80 mm) ja AP201 (170 mm) ilmavuotojen johdosta kappaleen 3.2.4 ensimmäisen oletusarvon mukaisilla epäpuhtauslähteen konsentraatioilla, kun tutkittavan rakenteen yli oleva paine-ero on 5 Pa.

Edellä esitetyn kuvaajan (Kuva 11) mukaisilla epäpuhtauslähteen konsentraatioilla (200 pmy/m<sup>3</sup> ja 600 pmy/m<sup>3</sup>) sisäilman epäpuhtauspitoisuudet olivat alle 50 pmy/m<sup>3</sup> rakennuksen käyttöaikana. Käyttäjän ulkopuolella ilmanvaihdon toiminnan muuttuessa sisäilman epäpuhtauspitoisuudet kasvavat voimakkaasti.



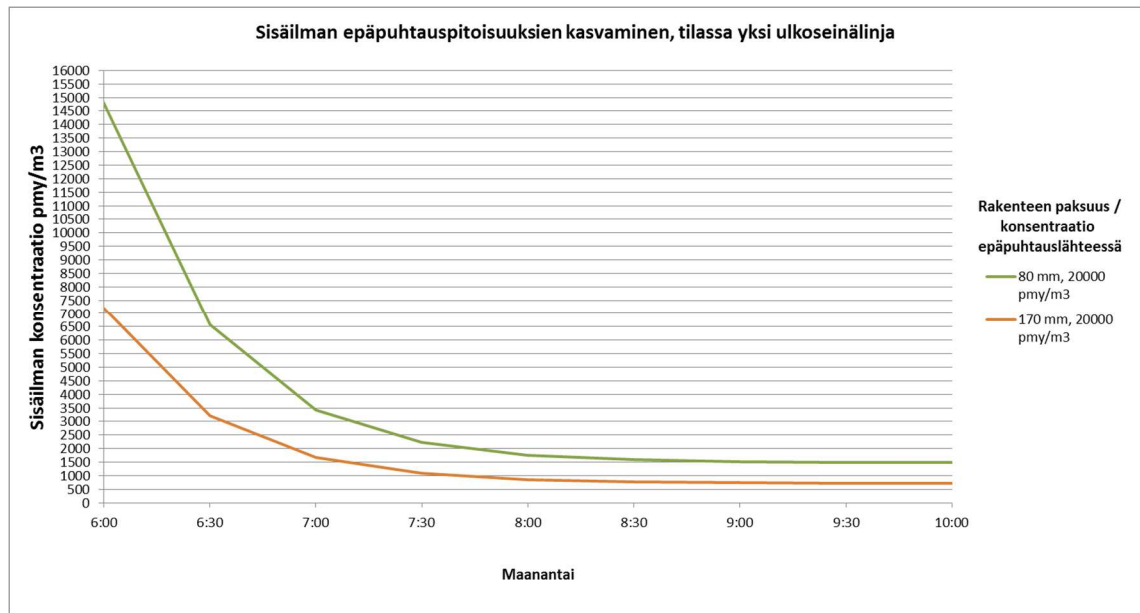
**Kuva 12.** Kuvaajassa on esitetty sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen alapohjarakenteiden AP205 (80 mm) ja AP201 (170 mm) ilmapuotojen johdosta kappaleen 3.2.4 toisen oletusarvon mukaisella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla, kun tutkittavan rakenteen yli oleva paine-ero on 5 Pa.

Edellä esitetyn kuvaajan (Kuva 12) mukaisella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla (20 000 pmy/m<sup>3</sup>) sisäilman epäpuhtauspitoisuudet olivat alle 1500 pmy/m<sup>3</sup> rakennuksen käyttöaikana. Käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihdon toiminnan muuttuessa sisäilman epäpuhtauspitoisuudet kasvavat voimakkaasti.

Käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihdon toiminnan muuttuessa sisäilman epäpuhtauspitoisuudet alkavat kasvaa voimakkaasti. Kun tilasta pelkästään poistetaan ilmaa koneellisesti, niin sisäilman epäpuhtauspitoisuudet nousevat lähes 10-kertaisiksi verrattuna rakennuksen käyttöajan epäpuhtauspitoisuuksiin, vaikka poistoilmakanavan kautta liikkuva ilmamäärä laskee kymmenesosaan (1,5 l/s käyttöaikana, 0,15 l/s käyttöajan ulkopuolella). Rakennuksen käyttöaikana koneellinen tuloilma mahdollistaa rakenneliittymän kautta tulevien epäpuhtauksien tehokkaan sekoittumisen huoneilmaan. Käyttöajan tehostetun ilmanvaihdon mahdollistama suurempi ilmanvaihtuvuus (ilmanvaihtokerroin 2 1/h) vaikuttaa myös siihen, että sisäilman epäpuhtauspitoisuudet eivät ehdi kasvaa suuri.

Tarkastelujakson alussa torstaina mallitilan epäpuhtauspitoisuus nousee normaalipitoisuuteen noin 2 tunnin kuluessa, kun sisäilman epäpuhtauspitoisuuden lähtöarvo on 0. Kun rakennuksen ilmanvaihdon toiminta muuttuu torstai-iltana klo 18:00, alkaa sisäilman epäpuhtauspitoisuus kasvaa tasaisesti perjantiaamuun klo 06:00 asti, mutta käyttöajan ulkopuolisena 12 tunnin jaksona epäpuhtauspitoisuus ei ehdi saavuttaa maksimipitoisuutta mallitilan mahdollistamissa olosuhteissa. Ilmanvaihdon toiminnan muuttuessa vastaamaan käyttöajan tehostettua toimintaa perjantiaamuna klo 06:00 sisäilman epäpuhtauspitoisuudet alkavat laskea nopeasti ja palautuvat käyttöajan normaalipitoisuuteen noin 2-2,5 tunnin kuluessa riippuen käyttöajan ulkopuolella syntyneen sisäilman konsentraation määrästä. Perjantai-iltana ilmanvaihdon kytkeytyessä käyttöajan

ulkopuoliselle asetukselle tilan epäpuhtauspitoisuudet kasvavat maksimipitoisuuteen noin vuorokaudessa laskentamallin mukaisissa olosuhteissa. Maanantaiaamuna klo 06:00 sisäilman epäpuhtauspitoisuudet alkavat laskea nopeasti ja palautuvat käyttöajan normaalipitoisuuteen noin 2-3 tunnin kuluessa riippuen käyttöajan ulkopuolella syntyneen sisäilman konsentraation määrästä. Suurin epäpuhtauspitoisuuksien laskeminen tapahtuu ensimmäisen tunnin aikana tilojen käyttöönotosta. Esimerkki maanantaiaamuna tapahtuvasta sisäilman epäpuhtauspitoisuuden laskemisesta on esitetty seuraavassa kuvaajassa (Kuva 13).



**Kuva 13.** Esimerkki mallitilan sisäilman epäpuhtauspitoisuuden laskemisesta maanantaiaamuna ilmanvaihdon muuttuessa rakennuksen käyttöajan mukaiselle asetukselle.

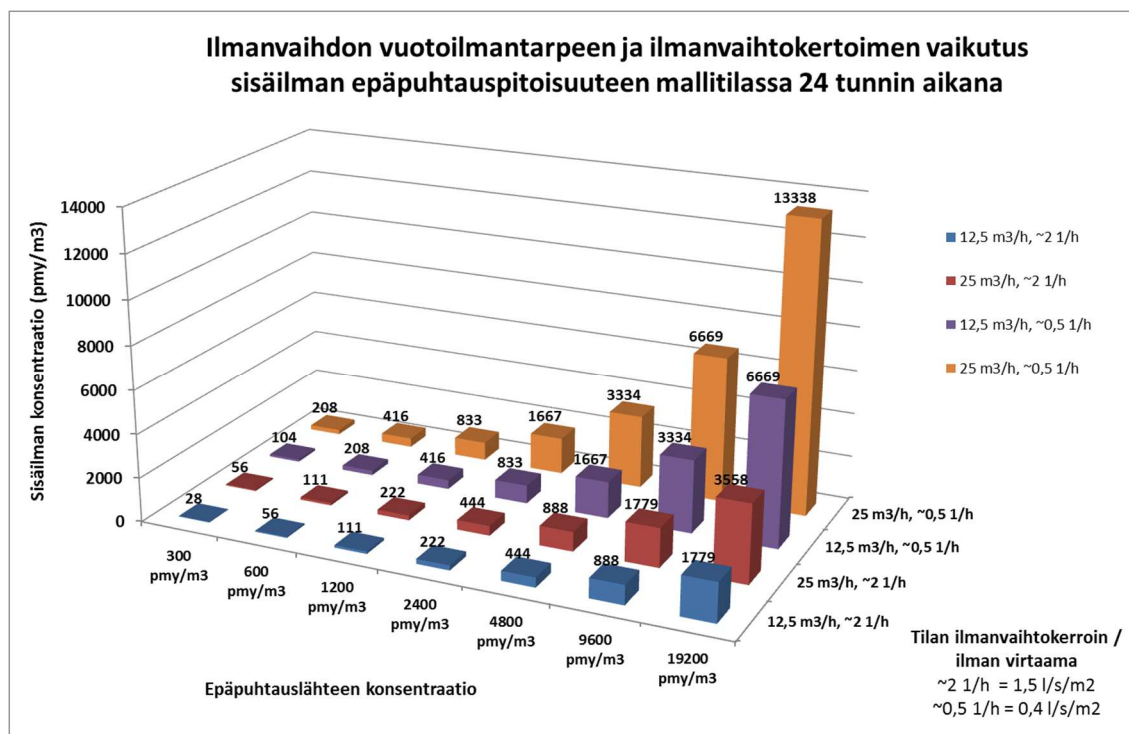
Kuvaajassa (Kuva 13) esitettyjen epäpuhtauspitoisuuksien laskeminen voidaan esittää myös prosentuaalisesti. Jos klo 10:00 pitoisuutta pidetään tilan käyttöajan normaalipitoisuutena, muodostuu epäpuhtauspitoisuuksien prosentuaalinen osuus verrattuna normaalipitoisuuteen seuraavan taulukon (Taulukko 6) mukaisesti.

**Taulukko 6.** Maanantaiaamun epäpuhtauspitoisuuden prosentuaalinen osuus tilan käyttöajan normaalipitoisuudesta klo 6:00-10:00.

Aika	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00
%-osuus	996 %	441 %	230 %	149 %	119 %	107 %	102 %	101 %	100 %

Edellisessä taulukossa (Taulukko 6) esitetyt epäpuhtauspitoisuuksien prosentuaaliset osuudet tilan käyttöajan normaalipitoisuudesta ovat yhteneviä kaikkien laskentamallissa käytettyjen epäpuhtauspitoisuuksien kesken. Epäpuhtauspitoisuuksien yhtenevään prosentuaaliseen muutokseen vaikuttaa tilan ilmanvaihtuvuus sekä ilmatilavuus. Kun laskentamallissa käytetty tilan ilmanvaihtuvuus ja ilmatilavuus ovat vakioita, on myös epäpuhtauksien prosentuaalinen osuus verrattuna normaalipitoisuuteen yhtenevä.

Laskentamallissa esitetyt alapohjarakenteet ja rakenneliittymän raon määritykset asettavat raja-arvot rakenneliittymässä tapahtuvalle ilman virtaamalle. Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 14) on esitetty eri lähtöarvoilla mallitilaan 24 tunnin aikana syntyviin sisäilman konsentraatioihin vaikuttavia tekijöitä epäpuhtauslähteen konsentraatio ja tilan ilmanvaihtokerroin huomioden, kun ilman virtaama perustuu vain ilmanvaihdon vuotoilmantarpeeseen.



**Kuva 14.** Kuvaajassa on esitetty sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen ilmanvaihdon vuotoilmantarpeen (ilman virtaaman) ja mallitilan ilmanvaihtokertoimen vaikutuksesta.

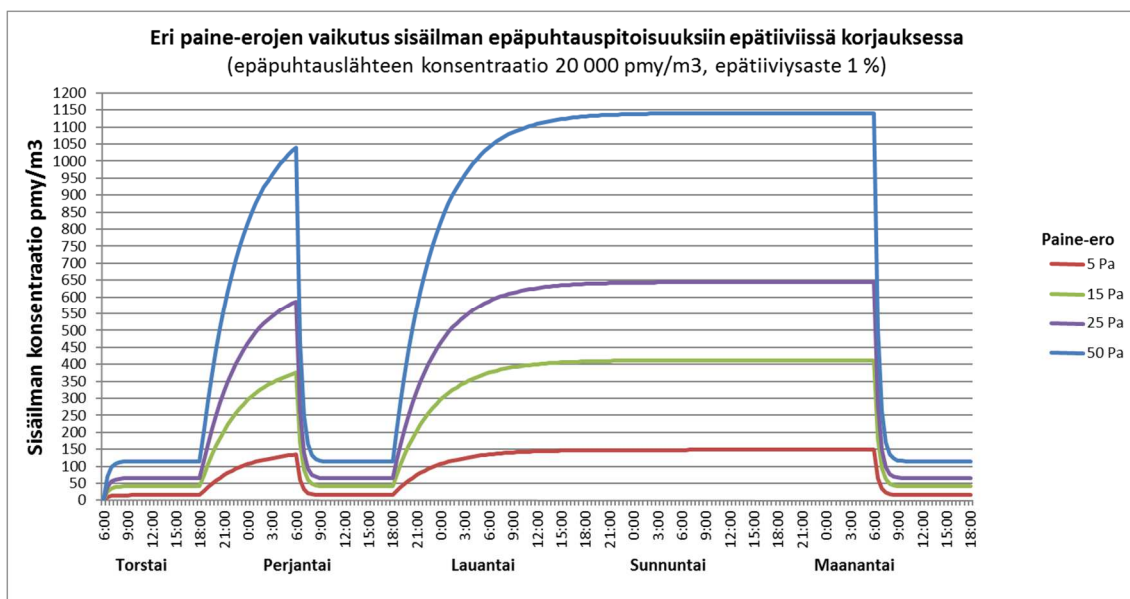
Edellisessä kuvaajassa (Kuva 14) ei ole huomioitu betonirakenteiden mahdollistamia vuotoilmareittejä, vaan ilman virtaama perustuu alipaineisen ilmanvaihdon vuotoilmantarpeeseen. Ilmanvaihtokertoimen avulla voidaan osoittaa ilmanvaihtuvuuden merkitys sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien tasolle. Pienimmällä vuotoilmantarpeellä (12,5 m³/h) ilmanvaihtokertoimen ollessa suurin (2 1/h) sisäilman konsentraatiot erikokoisilla epäpuhtauslähteen konsentraatioilla jäävät pitoisuuksiltaan pienimmiksi kaikista taulukossa esitetyistä malleista. Suurimmat sisäilman epäpuhtauspitoisuudet syntyvät suurimmalla vuotoilmantarpeellä (25 m³/h) sekä pienimmällä ilmanvaihtokertoimella (0,5 1/h).

### 3.4.5 Epätiiviiden korjausten vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin eri paine-eroissa

Rakenteiden ilmatiiviiden parantamistyössä on mahdollista esim. asennusvirheen sattuessa, että tehtyyn korjaukseen jää epätiiviitä kohtia. Seuraavissa kuvaajissa (Kuva 15 ja Kuva 16) on esitetty esimerkit tilanteista laskentamallissa käytetyssä mallitilassa erisuu-

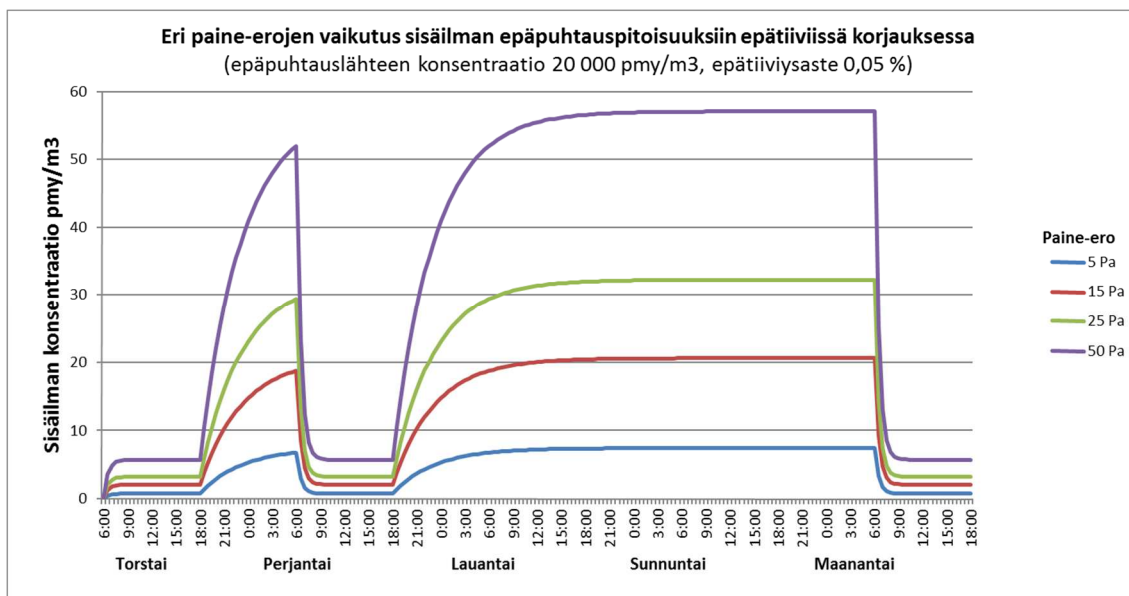


ruisissa tutkittavan alapohjarakenteen yli olevissa paine-eroissa, kun korjatun rakenteen epätiiviyssasteet ovat 1 % ja 0,05 %. Lisäksi kuvaajassa (Kuva 17) on esitetty esimerkki tilanteesta eri paine-eroissa kun ilman virtaamaan vaikuttaa vain 1 mm:n paksuinen rakennekerros. Kuvaajissa on käytetty aiemman kuvaajan (Kuva 12) mukaista suurinta 20 000 pmy/m<sup>3</sup> epäpuhtauslähteen konsentraatiota. Kuvaajissa (Kuva 15 ja Kuva 16) käytetty laskentatapa huomioi virtausreitteinä raon leveyden, rakenteen koko paksuuden sekä korjatun rakenteen epätiiviyssasteen mukaisen pituuden. Rakenneliittymässä tapahtuvia ilman sivuttaisvirtauksia ei huomioida.



**Kuva 15.** Kuvaajassa on esitetty sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen korjatun alapohjarakenteen AP205 epätiiviyyskohtien ilmavuotojen johdosta suurimman oletusarvon mukaisella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla, kun tutkittavan rakenteen yli oleva paine-ero muuttuu. Käytetty epätiiviyssaste vastaa mallirakenteessa 5 cm:n tiivistämätöntä aluetta. Ilman tilavuusvirta vuotokohdissa eri paine-eroissa on seuraava: 5 Pa=0,099 m<sup>3</sup>/h, 15 Pa=0,27 m<sup>3</sup>/h, 25 Pa=0,43 m<sup>3</sup>/h ja 50 Pa=0,77 m<sup>3</sup>/h.

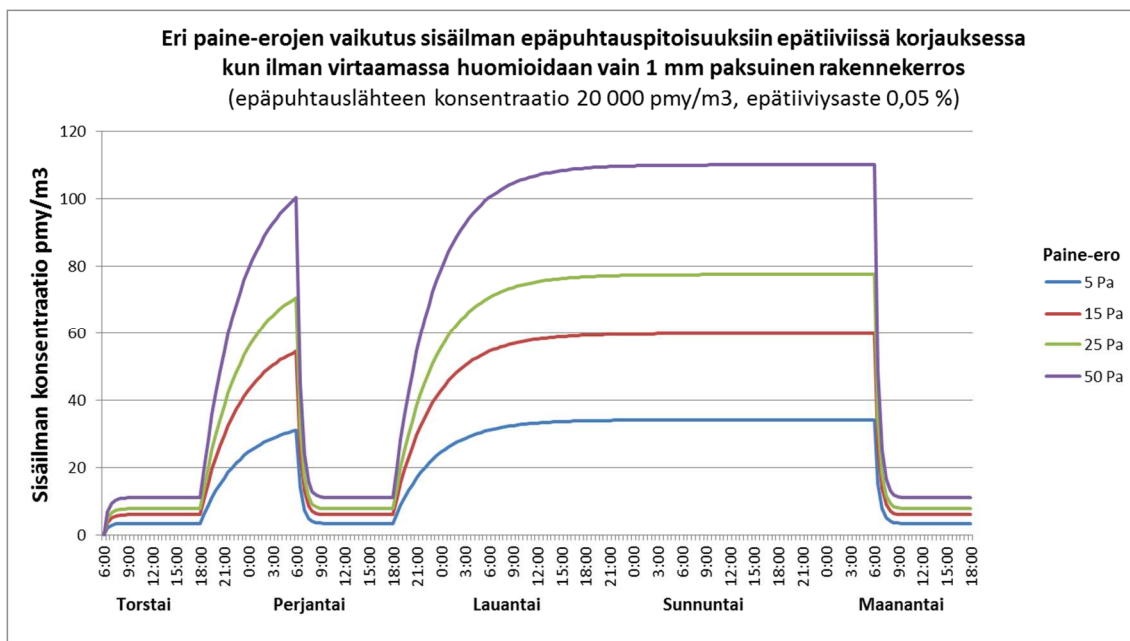
Kuvaajassa (Kuva 15) käytetty epätiiviyssaste vastaa mallirakenteessa 5 cm:n pituista tiivistämätöntä aluetta. Todellisessa ympäristössä tämän suuruusluokan tiivistämätöntä aluetta voivat esittää esimerkiksi läpivientien ympäristöt. Mallitilan olosuhteissa laskennassa käytetyllä suurella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla sisäilman epäpuhtauspitoisuudet pysyvät kohtuullisen matalalla tasolla kaikissa esitetyissä paine-eroissa (noin 20–120 pmy/m<sup>3</sup>) kun ilmanvaihto on normaalikäytöllä rakennuksen käyttöaikana. Käyttöajan ulkopuolella konsentraatiot kasvavat merkittävästi.



**Kuva 16.** Kuvaajassa on esitetty sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen korjatun alapohjarakenteen AP205 epätiivisyysohjeiden ilmavuotojen johdosta suurimman oletusarvon mukaisella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla, kun tutkittavan rakenteen yli oleva paine-ero muuttuu. Käytetty epätiivisyysaste vastaa mallirakenteessa pistemäisiä vuotokohtia (5 x 0,5mm). Ilman tilavuusvirta vuotokohdissa eri paine-eroissa on seuraava: 5 Pa=0,005 m<sup>3</sup>/h, 15 Pa=0,014 m<sup>3</sup>/h, 25 Pa=0,021 m<sup>3</sup>/h ja 50 Pa=0,038 m<sup>3</sup>/h.

Kuvaajassa (Kuva 16) käytetty epätiivisyysaste vastaa mallirakenteessa viittä 0,5 mm:n pituista pistemäistä vuotokohtaa. Todellisessa ympäristössä tämän suuruusluokan tiivistämätöntä aluetta voivat esittää esimerkiksi merkkiainetekniikalla havaitut vähäiset tai pistemäiset vuodot. Mallitilan olosuhteissa laskennassa käytetyllä suurella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla sisäilman epäpuhtauspitoisuudet pysyvät erittäin matalalla tasolla kaikissa esitetyissä paine-eroissa (> 10 pmy/m<sup>3</sup>), kun ilmanvaihto on normaalikäytöllä rakennuksen käyttöaikana. Käyttöajan ulkopuolella epäpuhtauspitoisuudet kasvavat merkittävästi paine-eron kasvaessa, mutta ylittävät 50 pmy/m<sup>3</sup> konsentraation vain 50 Pa:n alipaineisuudessa.





**Kuva 17.** Kuvaajassa on esitetty sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvaminen 1 mm paksuisen rakennekerroksen epätiiviyyskohtien ilmavuotojen johdosta suurimman oletusarvon mukaisella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla, kun tutkittavan rakenteen yli oleva paine-ero muuttuu. Käytetty epätiivisyysaste vastaa mallirakenteessa pistemäisiä vuotokohtia (5 x 0,5mm). Ilman tilavuusvirta vuotokohdissa eri paine-eroissa on seuraava: 5 Pa=0,024 m<sup>3</sup>/h, 15 Pa=0,04 m<sup>3</sup>/h, 25 Pa=0,052 m<sup>3</sup>/h ja 50 Pa=0,074 m<sup>3</sup>/h.

Kuvaajassa (Kuva 17) käytetty epätiivisyysaste vastaa aiemman kuvaajan mukaisesti viittä 0,5 mm:n pituista pistemäistä vuotokohtaa. Poikkeuksena tarkastelussa huomioidaan vain 1 mm paksuinen rakennekerros, joka on ainoa ilman virtaamaa rajoittava tekijä. Todellisessa ympäristössä tämän paksuista rakennekerrosta voivat vastata esimerkiksi vedeneristeet ja pinnoitteet. Tarkastelussa olevan suuruusluokan tiivistämätöntä aluetta voivat esittää esimerkiksi merkkiainetekniikalla havaitut vähäiset tai pistemäiset vuodot. Mallitilan olosuhteissa laskennassa käytetyllä suurella epäpuhtauslähteen konsentraatiolla sisäilman epäpuhtauspitoisuudet pysyvät erittäin matalalla tasolla kaikissa esitetyissä paine-eroissa ( $> 20 \text{ pmy/m}^3$ ), kun ilmanvaihto on normaalikäytöllä rakennuksen käyttöaikana. Käyttöajan ulkopuolella epäpuhtauspitoisuudet kasvavat merkittävästi paineeron kasvaessa, mutta ylittävät 100 pmy/m<sup>3</sup> konsentraation vain 50 Pa:n alipaineisuudessa.

### 3.4.6 Laskentaesimerkit ilman tilavuusvirran arvioimisesta maa-aineksissa

Laskentamallissa esitetyn kaavan (8) mukaisesti ilman tilavuusvirran arvioimisesta maa-aineksissa on esitetty eri maa-aineksissa liikkuvia ilmamääriä seuraavan taulukon (Taulukko 7) mukaisesti. Ilman virtaama on laskettu esimerkinomaisesti erityyppisille maa-aineksille. Laskennassa maa-aineskappale asetettiin tilavuudeltaan 1 m<sup>3</sup> kokoiseksi, jonka poikkileikkauspinta-ala on 1 m<sup>2</sup> ja pituus maa-aineksen läpi 1 m. Kappaleen

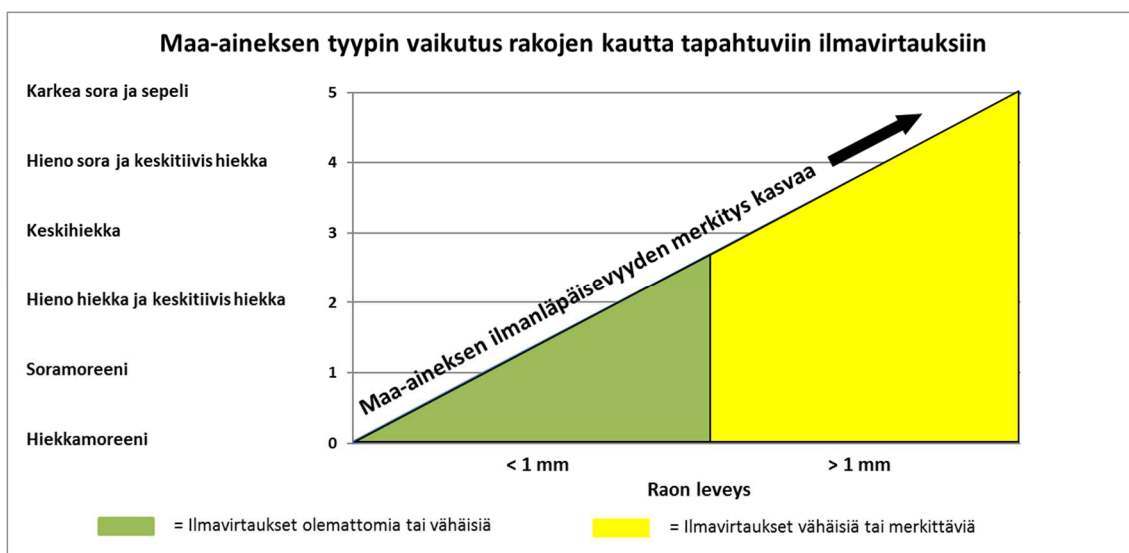
päiden välillä olevaksi paine-eroksi asetettiin laskentamallissakin käytetty 5 Pa. Laskennassa käytetty ilman dynaaminen viskositeetti 10 °C lämpötilassa on  $17,5 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ . Maa-aineksen ohjeelliset läpäisevyysarvot, ilmanläpäisevyydet ja keskimääräiset raekoot ovat esitetty aiemmassa teoriaosuuden taulukossa (Taulukko 4).

**Taulukko 7.** Taulukossa on esitetty eri maa-ainesten mahdollistamat ilman virtaamat ohjeellisilla läpäisevyysarvoilla  $1 \text{ m}^3$  kokoisessa tilavuudessa laskettuna paine-eron ollessa 5 Pa.

Maa-aines	Ilman tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
Kostea savi	0,000001
Siltti ja savimoreeni	0,00001
Hiekkamoreeni	0,0001
Soramoreeni	0,001
Hienohiekka ja keskitiivis hiekka	0,01
Keskihiekka	0,1
Hienosora ja keskitiivis sora	1
Karkea sora ja sepele	100

Taulukossa (Taulukko 7) esitetyistä ilman tilavuusvirroista eri maa-aineksissa voidaan todeta, että suuressa osassa maa-aineksista ilman tilavuusvirrat ovat rakenteiden rakojen mahdollistamiin ilmavirtauksiin verrattuina hyvin pieniä. Maa-ainesten mahdollistamat ilmavirtaukset kasvavat merkitykseltään sitä suuremmaksi, mitä suurempi on maa-aineksen raekoko ja huokoisuus. Riittävästi hienoainesta sisältävä maa-aines estää ilmavirtauksia tehokkaasti, mutta mahdollistaa myös kapillaarisen kosteuden nousun maa-aineksessa.

Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 18) on esitetty suuntaa antava malli eri maa-ainesten mahdollistamien ilmavirtausten huomioimisesta maanvastaisten betonirakenteiden rakojen kautta tapahtuvissa ilmavirtauksissa.



**Kuva 18.** Kuvaajassa on esitetty suuntaa antava malli maa-aineksen tyypin vaikutuksesta rakojen kautta tapahtuviin ilmavirtauksiin.

Edellisessä kuvaajassa (Kuva 18) raon leveys on jaettu merkittävyydeltään kahteen luokkaan. Ilmavirtausten kannalta merkittävimpiä ovat yli 1 mm levyiset raot sekä rae-kooltaan suurimmat ja huokoisimmat maa-aineet. Jos raon leveys on alle 1 mm tai maa-aine on hienojakoista, on todennäköisyys ilmavuotojen esiintymiselle maa-aineksessa olematon tai vähäinen.

### 3.5 Tulosten tarkastelu

Tulosten perusteella voidaan todeta, että ilman virtaamaan kokoluokaltaan alle 10 mm:n levyisissä raoissa vaikuttaa oleellisesti rakenteen paksuuden ja raon leveyden muodostama ilmanvastus. Mitä pienemmäksi rako muodostuu leveydeltään ja mitä pidemmäksi virtausreitti, eli rakenteen paksuus muodostuu, sitä enemmän ilman virtaama raon läpi vähenee.

Yleinen käsitys on, että rakennuksissa paine-eron kasvaessa ilman virtaama kasvaa samassa suhteessa. Laskentatulosten perusteella voidaan kuitenkin osoittaa, että ilman virtaaman ja paine-eron kasvun suhde ei ole symmetrinen, koska ilman virtaamaan vaikuttaa oleellisesti rakenteiden raoissa, halkeamissa ja liittymissä syntyvä ilmanvastus, joka vaihtelee hyvin paljon ilman virtausreitit ja -pituuden mukaan, vaikka virtaus pysyykin laminaarisena.

Todellisissa olosuhteissa rakennuksessa olevia vuotoilmareittejä on yleensä enemmän kuin yksi, jolloin paine-ero pyrkii tasaantumaan niistä vuotoilmareiteistä, mistä ilma liikkuu helpoiten. Ilmanvaihtojärjestelmän tulo- ja poistoilmavirran sallitun poikkeaman merkitys rakenneliittymän ilmatiiviuden asteittaiseen parantamiseen korostuu sitä enemmän, mitä tiiviimpi rakennus on kokonaisuutena. Ilmiö johtuu paine-eron kasvamisesta yksittäisessä vuotokohdassa. Jos rakennuksen yleinen ilmatiiviys on heikko,

niin asteittaisella ilmatiiviyden parantamisella on mahdollista saavuttaa prosentuaalisesti lähes sama vuotoilmamäärän väheneminen kyseisestä rakenneliittymästä rajoittamatta ilmanvaihdon ilmavirran sallittua poikkeamaa, koska paine-ero pysyy vakiona tasaantuneen muista epätiiviyskohdista. Tällöin siis ilmanvaihdon tarvitsema vuotoilmamäärä siirtyy sisätilaan muista vuotoilmareiteistä.

Laskentamallissa esitetyt mallitilan epäpuhtauspitoisuudet vastaavat tilannetta, jossa mikrobien kulkeutuminen tapahtuu laminaarisessa ilmavirtauksessa huomioimatta mikrobien liikkeille ominaisia depositio- ja resuspensioilmiöitä. Teoriaosuudessa käsiteltyjen tutkimuksissa todettujen epäpuhtauspitoisuuksien perusteella tuloksissa saatujen sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien voidaan olettaa olevan suuruusluokaltaan suurimpia mahdollisia pitoisuuksia mallitilan oletusarvoilla sekä asetetuilla raja-arvoilla tarkasteltuna. Todellisessa vastaavanlaisessa tilassa epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan voivat rajoittaa muun muassa rakojen leveyden ja sisäpintojen heterogeenisyys sekä depositio- ja resuspensioilmiöiden mahdollistamat mikrobien liikkeiden muutokset.

Laskelmissa oletusarvoina käytetyt ilmanäytteenottomenetelmällä mitatut epäpuhtauslähteiden konsentraatiot eivät vastaa nykytutkimuksen mukaista rakenteesta otettavaa materiaalinäytteenottomenetelmää, mutta laskentamallissa saadut tulokset antavat kuitenkin riittävällä tarkkuudella tietoa rakenteissa olevien epäpuhtauksien kulkeutumisesta sisäilmaan sekä epäpuhtauslähteiden konsentraatioiden vaikutuksesta sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvuun. Jotta laskelmissa käytettyjen epäpuhtauslähteiden konsentraatioiden ( $\text{pmy}/\text{m}^3$ ) mukaisia tuloksia epäpuhtauspitoisuuksien kasvamisesta sisätiloissa kyettäisiin hyödyntämään todellisissa kohteissa, tulisi laskennassa käytettävä epäpuhtauslähteen konsentraatio mitata suoraan tutkittavan rakenteen yli ilmanäytteenottomenetelmällä. Epävarmuustekijänä todellisissa kohteissa on kuitenkin epäpuhtauslähteen tuottaman konsentraation vaihtelu, jolloin mittaushetkellä mitattu pitoisuus ei välttämättä edusta suuruusluokaltaan epäpuhtauslähteen mahdollistamaa suurinta pitoisuutta.

Ilmanvaihdon toiminta on tärkein yksittäinen sisäympäristön olosuhteisiin vaikuttava tekijä. Jos ilmanvaihdon mitoitus perustuu RakMk D2 vähimmäisvaatimuksiin, kuten esimerkklaskelmissa, niin ilmanvaihdon käyttöaikoihin ja ilmavirtojen sallittuihin poikkeamiin tulee kiinnittää huomiota nykyistä vakiintunutta tapaa enemmän. Usein ilmanvaihto kytketään normaalitilaan esimerkiksi tunti ennen tilojen käyttöajan alkamista. Sekoitusyhtälön avulla tehdyistä kuvaajista voi todeta, että tunti on riittämätön aika sisäilman epäpuhtauspitoisuuden tasaantumiseen mm. mallitilan mukaisessa toimistotilassa. Laskentamallin mukaisilla oletusarvoilla sisäilman laadun varmistamiseksi mallitilan käyttöajan mukainen ilmanvaihto tulisi kytkeä päälle noin 3 tuntia ennen tilan käyttöä, jotta sisäilman epäpuhtauspitoisuudet ehtivät laskea täysin päiväkäyttöajan normaalille tasolle.

RakMk D2 mukaiset ilmavirtojen sallitut poikkeamat mahdollistavat merkittäviä painesuhteiden vaihteluita sekä synnyttävät sallittujen poikkeamien rajoissa merkittäviä vuo-

toilmantarpeita. Laskentamallin tuloksissa esitetyistä ilmavirran sallituista poikkeamista mallitilassa voi esittää johtopäätöksen, että tarve sallittujen poikkeaminen pienentämiselle on olemassa. Rakennusten yleisen ilmanpitävyyden parantuessa nykyiset ilmavirtojen sallitut poikkeamat mahdollistavat olosuhteet, joissa yksikin rakenteessa oleva epäpuhtauslähteen sisältävä epätiiviyskohta voi merkittävästi heikentää sisäilman laatua.

Laskentamallin kuvaajista, joissa esitetään eri paine-erojen vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin ns. epätiiviissä korjauksissa, voidaan todeta ilmanvaihdon toiminnan sekä säätöjen mahdollistaman paine-eron ja vuotoilmamäärän vaikutuksen olevan suuri sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Hallituissa paine-eroissa epätiiviilläkin korjauksella voidaan osoittaa olevan merkittävä sisäilman epäpuhtauspitoisuuksia vähentävä vaikutus, kun rakennuksesta poistetaan ja rakennukseen tuodaan ilmaa hallitusti. Rakennuksissa merkittävimmät sisäilman epäpuhtauspitoisuudet syntyvät sellaisilla ilmanvaihtotavoilla, joissa tuloilman saanti ja tulo- ja poistoilmamäärien välinen suhde eivät ole hallittua.

Laskentamallissa ilmanvaihdon oletusarvoina käytettiin tilan päiväkäyttöaikana ilmanvaihdon ilmavirtojen sallittuna poikkeamana 20 %, eli tuloilmavirta oli tilan käyttöaikana 20 % pienempi kuin poistoilmavirta. Käyttöajan ulkopuolella vain poistoilmanvaihto oli päällä. Jos epäpuhtauslähteen mahdollistamaa ilman virtaamaa ei ole rajoitettu ja laskennassa käytetty päiväkäyttöajan tuloilmavirran sallittu poikkeama olisi ollut 10 %, olisi laskentamallin kuvaajissa esitetyt päiväkäyttöajan epäpuhtauspitoisuudet 50 % pienemmät, kuin tuloksissa on esitetty. Ilmavirtojen sallitulla poikkeamalla voidaan osoittaa olevan merkittävä vaikutus tilan käyttöaikana sisäilmaan muodostuviin epäpuhtauspitoisuuksiin.

Eri maa-ainesten mahdollistamat ilmavirtaukset tulisi huomioida uudisrakentamisessa alapohjarakenteiden riittävällä ilmatiiviydellä, koska nykyiset rakentamisessa käytettävät maa-ainekset ovat raekooltaan suuria ja mahdollistavat merkittäviä ilmavirtauksia. Korjausrakentamisessa maanvastaisten rakenteiden ilmatiiviyyden riittävää tasoa arvioitaessa tulisi huomioida rakennuspaikalla käytetty maa-aines sekä sen mahdollistamat ilmavirtaukset perustellessa maaperän epäpuhtauksien kulkeutumista maa-ainesten ja alapohjarakenteiden kautta sisäilmaan.

## 4. YHTEENVETO

Betonirakenteissa sijaitsevat mikrobiologiset epäpuhtaudet, jotka ovat syntyneet esimerkiksi kosteusvaurion vaikutuksesta, voivat sisäilmaan päästessään heikentää oleellisesti sisäilman laatua. Rakennuksen betoninen ulkovaippa on usein ilmayhteydessä maaperään tai ulkoilmaan heikentäen sisäympäristön viihtyvyyttä vetoisuuden lisääntymisenä ja lämpöolosuhteiden heikentymisenä. Lisäksi ulkovaipparakenteisiin yhteydessä olevat maaperä sekä ulkoilma sisältävät jo luonnostaan epäpuhtauspitoisuuksia, jotka voivat sisäilmaan päästessään heikentää sisäilman laatua.

Rakennuksen vuotoilmamääriin vaikuttavat oleellisesti rakennuksen ilmanvaihdon toiminta sekä rakennuksen ilmatiiviys kokonaisuutena. Usein ilmanvaihdon säädöt tai toimintamalli mahdollistavat rakennuksen voimakkaan alipaineisuuden, joka taas mahdollistaa ilman liikkumisen rakenteista sisäilmaan vuotoilmareittien kautta. Rakennuksen ilmatiiviuden suhde vuotoilmamääriin on kompleksinen. Rakennuksen yleisesti heikko ilmatiiviys voi mahdollistaa tasaiset ilmamääriltään pienet ilmavirtaukset useista rakenneliittymistä, joissa tietyistä mikrobipitoisista rakenteista siirtyvät epäpuhtauspitoisuudet jäävät merkitykseltään pieniksi tai olemattomiksi. Jos taas samoissa ilmanvaihtolosuhteissa rakennuksen yleinen ilmatiiviys on hyvä ja yksittäisessä vuotoilmareittiin liittyvässä rakenteessa esiintyisi mikrobivaurio, olisi sisäilmaan siirtyvien epäpuhtauspitoisuuksien merkitys suuri, koska ilmanvaihdon vaatima vuotoilmamäärä kasvattaisi yksittäisen vuotoilmareitin kautta siirtyvää ilmamäärää paine-eron kasvamisen johdosta. Tämän vuoksi on tärkeää huomioida ilmanvaihdon tasapainotus rakennuksen yleiseen ilmatiiviyteen suhteutettuna. Rakenteiden riittävällä ilmatiiviydellä sekä sisäympäristön hallituilla painesuhteilla voidaan merkittävästi vaikuttaa sisäympäristön terveellisyyteen hallitsemattomia ilmavuotoja estämällä ja rajoittamalla.

Mikrobiologisten epäpuhtauksien, kuten sieni-itiöiden ja niiden fragmenttien, kulkeutuminen betonirakenteista ja vaikutus sisäilman laatuun ovat riippuvaisia useasta osatekijästä, kuten epäpuhtauksien sijainnista, mikrobikasvuston määrästä ja laadusta, ilmavirtausten voimakkuudesta, mikrobikasvustosta vapautuvien epäpuhtauksien pitoisuuksista sekä hiukkasten koosta ja massasta. Epäpuhtauslähteen tulee mahdollistaa ilmavirtaukset, jotta lähteen ilman mukana liikkuvat epäpuhtauspitoisuudet voivat vaikuttaa haitallisesti sisäilman laatuun. Tiiviit ja huokoskooltaan tiheät materiaalit tai rakennekerrokset eivät mahdollista suuria ilmavirtauksia, jolloin tällaisissa materiaaleissa tai rakennekerroksissa olevat epäpuhtaudet eivät siirry ilmavirtausten mukana tehokkaasti. Maaperä sisältää luonnollisesti mikrobeja sekä mahdollistaa epäpuhtauksien kulkeutumista ilmavirtausten mukana eriasteisesti maalajista riippuen. Mikrobikasvuston määrään ja laatuun betonirakenteissa vaikuttavat oleellisesti betonin mahdollistamat olosuh-

teet mikrobikasvulle, kuten rakenteen sijainti, rakenteen kosteuspitoisuus ja lämpötila, emäksisyys, pintojen karheus sekä huokoisuus. Ilmavirtauksen voimakkuuteen vaikuttavat rakenteiden rakojen ja halkeamien suuruus sekä rakennuksen painesuhteet. Mikrobikasvustoa ja -lajistoa voidaan tarkastella rajoitetusti suhteessa todennäköisiin terveysvaikutuksiin, epäpuhtauslähteen olosuhteisiin ja epäpuhtauslähteessä olevan vaurion ikään. Mikrobieen koolla ja massalla sekä depositio- ja resuspensiomekanismilla on merkitystä mikrobieen sisäilmaan kulkeutumisessa. Suurikokoiset ja massaltaan painavimmat hiukkaset eivät kulkeudu sisäilmaan tehokkaasti, koska niiden liikkeeseen ilmassa vaikuttaa vahvimmin painovoima sekä depositiomekanismi. Pienikokoiset ja massaltaan kevyet hiukkaset taas kykenevät liikkumaan ilmavirtojen mukana pitkäänkin sekä tarttumaan ilmavirtauksiin resuspensiomekanismin vaikutuksesta painovoiman vaikutuksen ollessa minimaalinen.

Betonirakenteissa ilmatiiviyteen vaikuttaa oleellisesti betonille ominainen kutistuminen sekä rakentamisen laatu. Erilaatuiset betonit kutistuvat eri tavoin, mutta yleensä ilmatiiviyden kannalta on huomioitava varsinkin pitkäaikaiskutistuma. Rakentamisen laatuun betonirakenteissa liittyvät yleisesti asennustyön ja jälkihoidon laatu sekä rakenteiden sallitut toleranssit. Asennusvirheet, kuivumiskutistuma sekä suuret toleranssit mahdollistavat merkittävät ilmavirtaukset rakenteiden liittymäkohdista, jolloin merkittäväksi tekijäksi rakenteen ilmatiiviyden kannalta tulevat rakenteiden liitoksissa käytettävät erikseen asennettavat materiaalit.

Betonirakenteiden ilmatiiviyden parantamisessa käytettävissä materiaaleissa tulee huomioida muun muassa asennuksen suunniteltu käyttöikä sekä sen asettamat vaatimukset materiaalin ominaisuuksille. Mitä pidemmäksi ajaksi asennuksen käyttöaika suunnitellaan, sitä enemmän korostuvat materiaalin pitkäaikaiskestävyys, hoidettavuus ja huollettavuus. Asennusta suunniteltaessa on huomioitava myös asennusalueen, eli betonirakenteen jäljellä oleva käyttöikä sekä koko rakennuksen elinkaaren vaihe. Liian kevyt asennustapa voi synnyttää ylimääräisiä ylläpito- tai huoltokertoja ja suunnitellun asennuksen kokonaiskustannus voi moninkertaistua rakennuksen käyttövaiheen aikana. Liian raskas asennustapa rakennuksen käyttövaiheen loppupuolella voi taas aiheuttaa turhia kustannuksia lyhyen käyttöajan vuoksi, jolloin raskaan asennustavan mahdollistamat ylläpito- ja huoltokustannusten säästöt rakennuksen käyttövaiheen aikana eivät ehdi realisoitua. Sisäilmakorjauksissa korjausaste ja -menetelmä voi olla riittämätön korjaukseen valittujen materiaalien pitkäaikaiskestävyyden, hoidettavuuden ja huollettavuuden näkökulmasta rakennuksen jäljellä olevaan käyttöikään nähden. Suuri korjausaste, kuten rakenteita purkava/uusiva korjausmenetelmä voi synnyttää ongelmia rakennuksen elinkaaren myöhemmässä vaiheessa esimerkiksi korjattujen rakenteiden muodonmuutosten vuoksi ja tavoiteltu sisäilman laadun parantuminen voi jäädä lyhytaikaiseksi hyödyksi.

Diplomityön teoriaosuudessa esitetyn kuvaajan (Kuva 4) perusteella voidaan arvioida, että rakenteessa olevan raon leveyden ollessa alle 1 mm, alkaa mikrobieen läpäisykerroin laskea huomattavasti. Tutkimuksen perusteella laskentamallissa käytetyn 1,25 mm raon

leveyden voidaan olettaa olevan leveydeltään riittävä yleisimpien mikrobi-itiöiden ja niitä pienempien hiukkasten kulkeutumiseen raon kautta. Laskentamallin mukaisten ilman virtaaman laskelmien perusteella voidaan myös osoittaa, että alle 1 mm rakojen kautta liikkuvat ilmamäärät ovat erittäin pieniä mallitilan mukaisilla oletusarvoilla rakennuksissa olevissa normaaleissa paine-eroissa. Kuitenkin käytännössä pienienkin rakojen merkitys sisäilman laatuun kasvaa rakojen kokonaismäärän ja –pituuden lisäntyessä.

Diplomityössä toteutetun laskentamallin tuloksista voidaan esittää useita johtopäätöksiä betonirakenteissa olevien rakojen vaikutuksesta niiden kautta kulkeviin ilmamääriin. Kun raon leveys pysyy vakiona, raon pituus kaksinkertaistuu ja paine-ero tutkittavan rakenteen yli pysyy vakiona, niin ilman tilavuusvirta raon läpi kasvaa samassa suhteessa raon pinta-alan nähden, kun kyseessä on laminaarinen suora virtaus. Raon leveydestä riippuvalla ilmanvastuksella on suuri vaikutus raon läpi virtaamaan ilmamäärään. Mitä suuremmaksi rako muodostuu leveydeltään, sitä pienempi ilmanvastus raolla on. Leveydeltään pienissä raoissa rakenteen paksuuden merkitys kasvaa, koska ilmanvastus kasvaa, joka taas rajoittaa tietyssä paine-erossa liikkuvaa ilmamäärää. Raon leveydellä voidaan osoittaa olevan suuri merkitys rakenteen läpi virtaavaan ilmamäärään eripituksilla rakenteilla ja erisuuruisilla tutkittavan rakenteen yli olevilla paine-eroilla.

Pinta-alaltaan suurissa betonirakennekokonaisuuksissa, joissa mm. kutistuman aiheuttamat raot voivat olla suuria, merkittävin tekijä epäpuhtauksien kulkeutumisessa sisäilmaan on ilmanvaihdon vuotoilmantarve. Jos laskentamallissa käytetyn mallitilan ulkoseinän ja lattian liittymän ilmatiiviyttä parannetaan asteittain korjattavan rakenteen yli olevan paine-eron säilyessä samana, on ilman tilavuusvirta raossa suorassa suhteessa ilmanvaihdon tarvitsemaan vuotoilmamäärään. Tuloksissa esitetystä taulukon esimerkiksi todettiin, että ilmapirran sallitun poikkeaman tulee laskea prosentuaalisesti lähes saman verran, kuin rakenneliittymän ilmatiiviyttä parannetaan, jotta korjattavan rakenneliittymän yli oleva paine-ero säilyy samana ja rakenneliittymästä tuleva vuotoilmamäärä vähenee ilmatiiviyden asteittaisen parantamisen mukaisessa suhteessa.

Ilmanvaihdon toiminta vaikuttaa oleellisesti sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Laskentamallissa käytetyn koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon toimiessa rakennuksen käyttöaikana tilaan tuodaan ja tilasta poistetaan ilmaa koneellisesti. Rakennuksen käyttöajan ulkopuolella tilasta pelkästään poistetaan ilmaa koneellisesti. Diplomityön tuloksissa esitetystä sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien kasvamisesta havainnollistavista kuvaajista todettiin, että käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihdon toiminnan muuttuessa sisäilman epäpuhtauspitoisuudet alkavat kasvaa voimakkaasti. Kun tilasta pelkästään poistetaan ilmaa koneellisesti, niin sisäilman epäpuhtauspitoisuudet nousevat lähes 10-kertaisiksi verrattuna rakennuksen käyttöajan epäpuhtauspitoisuuksiin, vaikka poistoilmakanavan kautta liikkuva ilmamäärä laskee kymmenesosaan. Rakennuksen käyttöaikana koneellinen tuloilma mahdollistaa rakenneliittymän kautta tulevien epäpuhtauksien tehokkaan sekoittumisen huoneilmaan. Käyttöajan tehostetun ilmanvaihdon mahdollis-



tama suurempi ilmanvaihtuvuus vaikuttaa myös siihen, että sisäilman epäpuhtauspitoisuudet eivät ehdi kasvaa suuriksi.

Rakenteiden ilmatiiviyden parantamisessa on mahdollista esim. asennusvirheen sattuesssa, että tehtyyn korjaukseen jää epätiiviitä kohtia. Laskentamallin rakennetyyppien oletusarvojen mukaisissa olosuhteissa sisäilman konsentraatiot pysyivät kohtuullisen matalalla tasolla kaikissa esitetyissä paine-eroissa rakennuksen käyttöaikana. Käyttöajan ulkopuolella konsentraatiot kasvoivat merkittävästi paine-eron kasvaessa ja ylittivät suuremmissa paine-eroissa esimerkiksi asuinrakennuksille ohjeistetut viitearvot. Ilmatiiviyden parantamiseksi tehdyn korjauksen epätiiviyiskohtien merkitys korostuukin silloin, kun korjatun rakenteen yli oleva paine-ero on suuri, ilmanvaihdon toiminta on puutteellista ja epäpuhtauslähteen tuottama epäpuhtauspitoisuus on merkittävä.

Betonirakenteiden kautta kulkeutuviin epäpuhtauspitoisuuksiin vaikuttaa painesuhteiden mahdollistamien ilmavirtauksien lisäksi oleellisesti myös lähteen mahdollistamat ilmavirtaukset, kuten betonin ulkopintaa vasten olevan materiaalin ilmanläpäisevyys. Esimerkiksi, jos kyseessä on maanvastainen betonirakenne, eli rakenteen ulkopinta on maata täyttää vasten, tulee arvioitavaksi myös maa-ainesten ilmanläpäisevyys. Maanvastaisten rakenteiden ilmatiiviyden tärkeys korostuukin useimmiten sellaisissa pohjarakenteiden olosuhteissa, joissa rakenteen ulkopuolisen täyttömaan ilmanläpäisevyys on suuri ja maataytön olosuhteet mahdollistavat mikrobikasvun.

Diplomityön laskentamallin tuloksia sekä RT-ohjekortin ”Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein” ohjeistuksia suhteutettiin betonirakenteisiin liittyvissä sisäilmakorjauksissa tavoiteltaviin ilmatiiviytasoihin. Ilmatiiviyden tavoitetasot asetettiin eriasteisiksi korjaustasoiksi, joissa esitettiin ilmatiiviyden parantamiseen liittyvien korjauksien tavoitteelliset, toiminnalliset ja laadulliset kriteerit. Korjaustasoiksi määriteltiin tavanomainen, vaativa ja poikkeuksellisen vaativa korjaustaso. Korjaustasoa valittaessa kohteessa tulee olla selvitettyä sisäilman sekä mahdollisen sisäilmaongelman laatu. Korjaustason valinnan tulee perustua riskiarviointimenettelyyn, jossa arvioidaan sisäympäristön olosuhteet, korjattavassa rakenteessa olevan sisäilmahaitan tai -riskin olemassaolo, sisäilmahaitan mahdollinen reitti sisäilmaan sekä vaikutus sisäilman laatuun ja mahdollisesti ihmisen terveyteen. Sisäilmahaitat ja – riskit tunnistetaan, määritetään ja niiden merkitys sisäilmaan arvioidaan tapauskohtaisesti. Riskiarvioinnin perusteella korjaustyössä huomioidaan ne tekniset ja laadulliset menetelmät, joita valittu korjaustyössä noudatettava tavoitetaso edellyttää. Esitys korjaustasojen määrittämisohjeeksi on tämän diplomityön liitteenä 1.

Diplomityön jatkotutkimus- ja kehitystarpeena esitetään sisäilmaan ilman mukana liikkuvien mikrobien sekä niiden depositio- ja resuspensiomekanismin vaikutuksen huomioiva tarkempi tutkimus, betonirakenteiden ilmatiiviyden parantamiseen liittyvien korjaustasojen linjausten ja käytännön toteutuksen yhdenmukaistamisen kehittäminen,

rakennuksen painesuhteiden hallinnan kehittäminen sekä paine-erojen mittaustekniikoiden tarkempi vertaileva tutkimus.

## LÄHTEET

- [1] K. Laine, Rakenteiden ilmatiiviyden parantaminen sisäilmakorjauksessa, Rakennusterveys, Koulutus- ja kehittämispalvelu Aducate, Itä-Suomen yliopisto Kuopio 2014, s. 9-117.
- [2] Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus, Ympäristöopas 28, Ympäristöministeriö ja Rakennustieto Oy, Tampere 1998, s. 57–60.
- [3] RIL-255-1-2014, Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 2014, s. 46–338.
- [4] Asumisterveysohje (kumottu osittain asumisterveysasetuksella), Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät, Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita, Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003, s. 71–79.
- [5] H. Salonen, S. Lappalainen, M. Lahtinen, R. Holopainen, E. Palomäki, H. Koskela, P. Backlund, R. Niemelä, A-L Pasanen, K. Reijula, Toimiston sisäilmaston tutkiminen, Työterveyslaitoksen oppaita, Työterveyslaitos, Helsinki 2011, s. 18.
- [6] T. Putus, Home ja terveys, Kosteusvauriohomeiden, hiivojen ja sädesienten esiintyminen ja terveyshaitat, Suomen Ympäristö- ja Terveysalan Kustannus Oy, Pori 2014, s. 6-64.
- [7] M. J. Carlile, S. C. Watkinson, G. W. Gooday, The fungi, Academic Press, Lontoo 2001, s. 222-223.
- [8] R. L. Górny, Filamentous microorganisms and their fragments in indoor air –a review, Ann Agric Environ Med, Volume 11, 2004, 190 s.
- [9] V. Leivo, Opas kosteusongelmiin – Rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma, Julkaisu 95, Rakennustekniikan osasto, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere 1998, s. 49.
- [10] T. Reponen, A. Nevalainen, M. Jantunen, M. Pellikka, P. Kalliokoski, Normal range criteria for indoor air bacteria and fungal spores in a subarctic climate. Indoor Air Volume 2, 1992, p. 26-31.
- [11] H. Kauppi, Mikrobivaurioituneiden rakenteiden tutkiminen: Rakenteesta otettava ilmanäyte tutkimusten apuna, Korjausrakentamisen koulutusohjelma, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 2013, s. 52–64.
- [12] J. Malinen, Kaksoislaattapalkistorakenteen tutkimus- ja korjausmenetelmät, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma, Insinööritieteiden korkeakoulu, Aalto-yliopisto, 2015, s. 51–78.

- [13] J. Kurnitski, P. Pasanen, M. Matilainen, M. Hyttinen, V. Asikainen, Ryömintätilan kosteus ja mikrobit, Raportti B62, LVI-tekniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, 1999, s. 33–59. Saatavissa:  
<http://www.malander.fi/assets/files/LVI-lab-raportti-B62.pdf>
- [14] S. Rautiala, Microbial exposure in remediation work, Kuopion yliopiston julkaisuja C. Luonnontieteet ja ympäristötieteet 171, Kuopio 2004, 74 s.
- [15] Asumisterveysasetus, Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista, Sosiaali- ja terveysministeriö, 2015, s. 1-5.
- [16] Työterveyslaitoksen käyttämiä viitearvoja sisäympäristön ongelmien tunnistamisessa toimistotyöympäristöissä, ohje Työterveyslaitoksen verkkosivuilla 10.12.2015. 6 s. Saatavissa:  
[http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/sisailma\\_ja\\_sisaymparisto/Documents/sisaympariston\\_viitearvoja\\_141015\\_netiversio.pdf](http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/sisailma_ja_sisaymparisto/Documents/sisaympariston_viitearvoja_141015_netiversio.pdf)
- [17] T. Meklin, T. Putus, A. Hyvärinen, U. Haverinen-Shaughnessy, U. Lignell, A. Nevalainen, Koulurakennusten kosteus- ja homevauriot, Opas ongelmien selvittämiseen, Kansanterveyslaitoksen julkaisuja, Kansanterveyslaitos, 2007, s. 23–24.
- [18] H. Viitanen, Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet – betonin homeenkesto, VTT:n tiedotteita, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2004, 24 s. Saatavissa:  
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2004/W6.pdf>
- [19] Mikrobikasvun edellytykset, Terveelliset tilat – tietojärjestelmä, Sisäilmayhdistys. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/mikrobit/mikrobikasvun-edellytykset/>
- [20] J. Vinha, H. Viitanen, R. Peuhkuri, K. Lähdesmäki, T. Ojanen, K. Salminen, Rakennusfysiikka 2013, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, Seminaarijulkaisu 3, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. s. 67–76.
- [21] A-M Pessi, J. Suonketo, M. Pentti, A. Rantio-Lentimäki, Betonielementtijulkisivujen mikrobiologinen toimivuus, Julkaisu 101, Talonrakennustekniikka, Rakennustekniikan osasto, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere 1999, s. 42–73.
- [22] Asumisterveysopas, 3. korjattu painos, Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysohjeen (STM:n oppaita 2003:1) soveltamisopas, Ympäristö ja terveys-lehti 2009, s. 153–173.

- [23] S. Häkkinen, DG18-alustan käytettävyyden asumisterveyden mikrobitutkimuksissa, Aerobiologian yksikkö, TYYK, Turun yliopisto, 2012, PowerPoint-esitys. Saatavissa:  
[http://www.evira.fi/files/attachments/fi/evira/tapahtumat/labra/laba2012/dg\\_18\\_-alustan\\_kaytettavyys.pdf](http://www.evira.fi/files/attachments/fi/evira/tapahtumat/labra/laba2012/dg_18_-alustan_kaytettavyys.pdf)
- [24] T. Pääkkilä, Mikrobin kulkeutuminen sisäilmaan paine-eron vaikutuksesta, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma, Insinööritieteiden korkeakoulu, Aalto-yliopisto, 2012, s. 115–141.
- [25] Dampness and mould, WHO Guidelines for Indoor Air Quality, WHO Regional office for Europe, Kööpenhamina 2009, 55 s. Saatavissa:  
<http://www.who.int/indoorair/publications/7989289041683/en/>
- [26] A. F. Vette, A. W. Rea, P. A. Lawless, C. E. Rodes, G. Evans, V. R. Highsmith, L. Sheldon, Characterization of Indoor-Outdoor Aerosol Concentration Relationships during the Fresno PM Exposure Studies, Aerosol Science and Technology, 2001, 125 s.
- [27] D-L. Liu, W. W. Nazaroff, Modeling pollutant penetration across building envelopes. Atmospheric Environment, Volume 35, Issue 26, 2001, s. 4451–4462.
- [28] A-V. Kettunen, J. Bergman, M. Viljanen, Radonin merkitys talonrakennustekniikassa, Rakennuspohjan tuuletuksen suunnittelu, Julkaisu 106, Rakennetekniikan laitos, Teknillinen korkeakoulu, Espoo 1990, s. 17–21.
- [29] Maalaji, julkaisu Wikipediassa 22.1.2016. Saatavissa:  
<https://fi.wikipedia.org/wiki/Maalaji>
- [30] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3, Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2012, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.
- [31] RT 80–10974. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustietosäätiö, ohjetiedosto. 2009, 8 s.
- [32] RT 02-10996, Rakennusalan toleranssit, toleranssien määritelmät ja suositeltavat lukuarvot, Rakennustietosäätiö, ohjetiedosto. 2010, 2 s.
- [33] RT 18–10922, Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot, Rakennustietosäätiö, ohjetiedosto, 2008, s. 1-7.
- [34] T. Merikallio, S. Niemi, J. Komonen, Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen, Suomen Betonitieto Oy, 2007, s. 24–26.

- [35] M. Leivo, E. Holt, A. Kronlöf, K. Söderlund, P. Vuorinen, Betonin kutistuma, Artikkelit Betonilehdessä 3/2000, s. 1-4. Saatavissa: [http://www.betoni.com/Download/21784/BL\\_2000\\_3\\_s52\\_53.pdf](http://www.betoni.com/Download/21784/BL_2000_3_s52_53.pdf)
- [36] RT 14–10850, Rakennuksen lämpökuvaus, Rakennustietosäätiö, ohjetiedosto. 2005, s. 1-2.
- [37] RT 14–11197, Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein, Rakennustietosäätiö, ohjetiedosto. 2015, s. 1-2.
- [38] J. Aatsalo, Tiivistyskorjauksen elinkaari on ehkä vain viisi vuotta. Artikkelit Rakennuslehden verkkosivuilla 10.10.2014. Saatavissa: <http://www.rakennuslehti.fi/2014/10/tiivistyskorjauksen-elinkaari-on-ehka-vain-viisi-vuotta/>
- [39] H. Hakamäki, Toteutustavan vaikutus ulkovaipparakenteen sisäpinnan ilmavuototiivistysten pysyvyyteen, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma, Insinööritieteiden korkeakoulu, Aalto-yliopisto, 2015, s. 72–78.
- [40] Rakennusteollisuus RT ry, Rakennuksen elinkaari, Sivut Rakennusteollisuuden verkkosivuilla 23.12.2015. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Kestava-rakentaminen/Rakennuksen-elinkaari/>
- [41] Betoniteollisuus ry, Betonin käyttöikä, sivu Betoniteollisuus Ry:n verkkosivuilla 23.12.2015. Saatavissa: <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-kestava-kehitys/betonin-kayttoika>
- [42] RT 95–11151, Toimistotilat, yleiset suunnitteluperusteet, Rakennustietosäätiö, ohjetiedosto, 2014, s. 5.
- [43] RT 83–10444, Alapohjarakenteita, Rakennustietosäätiö, ohjetiedosto, 1991, s. 2-6.
- [44] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet 2012, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.
- [45] J. Vinha, RTEK-3511 Rakennusfysiikka luentomoniste, Konvektio rakenteissa olevan raon tai reiän läpi, Rakennustekniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2011, s. 289-300.
- [46] R. Giles, J. Evett & C. Liu, Schaum's outline of theory and problems of fluid mechanics and hydraulics, 3. edition, McGraw-Hill Professional, 1994. 138 s.

- [47] L.E Nevander, B. Elmarsson, Fukt handbok 3. painos, AB Svensk Byggtjänst och författarna, Mölnlycke: Elanders Sverige AB, 2009, 538 s.

# ESITYS KORJAUSTASOJEN MÄÄRITYSOHJEEKSI

## Betonirakenteiden ilmatiiviyden hallinnan periaatteet

Käsitteenä ilmatiiviyden hallinta kertoo kompleksisesta kokonaisuudesta, joka määrittellemällä saavutetaan riittävä sisäilman laadun taso epäpuhtauksien sisäilmaan pääsyä estämällä tai rajoittamalla terveellisestä ja toiminnallisesta näkökulmasta.

Diplomityön laskentamallissa on esitetty ilmatiiviyden parantamisen vaikutuksia sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin, jonka tuloksina on esitetty, että jopa osittaisillakin parannustoimilla saadaan rajoitettua sisäilman epäpuhtauspitoisuuksia hallituissa sisäympäristön olosuhteissa. Työssä käsitellyt betonirakenteiden ilmatiiviyden hallintamenetelmät koostuvat sisätiloihin soveltuvista korjausmenetelmistä sekä ilmanvaihdon tasapainotukseen ja rakennuksen painesuhteisiin liittyvistä tekijöistä.

Ilmatiiviyden hallintaan kuuluvat sisäilman laatua parantavat tavoitteet voivat olla esimerkiksi energiataloudellisuuden parantaminen, hallitsemattomien ilmavirtausten estäminen tai epäpuhtauksien pääsyn estäminen sisäilmaan. Sisäilmakorjauksissa tarve paremmalle ilmatiiviydelle voi olla esimerkiksi aikaan sidottu korjaustyön valmistumisen tai korjaukselle tavoitellun käyttöiän mukaan ja vaatimus ilmatiiviyden parantamisen sekä ilmanpitävyyden tasolle voi vaihdella. Siksi onkin tärkeää, että betonirakenteisiin kohdistuvissa sisäilmakorjauksissa ilmatiiviydelle asetetaan tavoitetasot tarvetta vastaavaksi eriasteisilla korjaustasoilla.

## Korjaustasojen kriteerit

### Sisäilman laatu

Sisäilman laatutekijät jaetaan eri tekijöihin, sisäympäristön viihtyvyyttä heikentäviin tekijöihin ja terveydelle haitallisiin tekijöihin. Korjaustasoa valittaessa kohteessa tulee olla selvitettyä sisäilman sekä mahdollisen sisäilmaongelman laatu. Korjaustason valinnan tulee perustua riskiarviointimenettelyyn, jossa arvioidaan korjattavassa rakenteessa olevan sisäilmahaitan tai -riskin olemassaolo, sisäilmahaitan mahdollinen reitti sisäilmaan sekä vaikutus sisäilman laatuun ja mahdollisesti ihmisen terveyteen. Sisäilmahaitat ja – riskit tunnistetaan, määritetään ja niiden merkitys sisäilmaan arvioidaan tapauskohtaisesti.



**Sisäilmakysely tehty, kaikki korjaustasot:** Sisäilman laadun yleistä arviointia varten kaikissa korjaustasoissa suositellaan suoritettavaksi sisäilmakysely rakennuksen käyttäjille. Sisäilmakyselyn tavoitteena on selvittää käyttäjien kokemukset rakennuksen sisäilmasta, sisäilman mahdollisesti aiheuttamista oireista ja kerätä tietoa mahdollisista käyttäjien havaitsemista poikkeamista rakennuksen sisäilmaan vaikuttavista tekijöistä.

**Tarvittavat tutkimukset tehty, kaikki korjaustasot:** Korjaustasojen määrittämiseksi kohteessa tulee olla tehtynä riittävä tutkimus, joissa huomioidaan tarpeen mukaan rakenteen kosteuspitoisuus sekä arvioidaan rakenteiden tiivistämisen vaikutus rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Rakenteessa oleva aktiivinen kosteusvaurio ja sen lähde tulee poistaa ennen korjausta. Rakenteen vaatiessa kuivumista on suositeltavaa valita korjaustavaksi vesihöyryä hyvin läpäiseviä materiaaleja, koska muutoin rakenteen kuivumiskyky voi heikentyä sisäpintojen ilmatiiviiden parantuessa. Korjauksen suunnittelijan on huomioitava eri materiaalien rakennusfysikaalinen toimivuus korjausmenetelmää valittaessa tapauskohtaisesti.

**Tavanomainen:** Tavanomaisessa korjaustasossa on kyseessä rakenteen ilmatiiviiden parantaminen, jonka tarkoituksena on vähentää rakennuksen energiankulutusta sekä estää hallitsemattomia ilmavuotoja, mutta haitallisia epäpuhtauksia ei esiinny rakenteissa ja sisäilmassa.

**Vaativa:** Vaativassa korjaustasossa on kyseessä merkittävä ilmatiiviiden parantaminen, jonka tarkoituksena on estää tai rajoittaa haitallisten epäpuhtauksien pääsy sisäilmaan tiloissa tai tilakokonaisuuksissa, joihin liittyvissä rakenteissa on todettu haitallisia epäpuhtauksia ja vuotoilmareitti sisäilmaan.

**Poikkeuksellisen vaativa:** Poikkeuksellisen vaativassa korjaustasossa on kyseessä korjatun rakenteen osalta täysin ilmatiivis korjausmenetelmä, jonka tarkoituksena on estää haitallisten epäpuhtauksien pääsy sisäilmaan rakennuksissa, joissa on todettu merkittäviä haitallisia epäpuhtauspitoisuuksia rakenteissa sekä sisäilmassa ja niiden välinen syy-seuraussuhde on osoitettu.

## **Materiaalipäästöt**

**Materiaalipäästöt, kaikki korjaustasot:** Jokaiseen korjaustasoon suositukseksi on asetettu kansallinen M1- tai eurooppalainen EC1+ -päästöluokitus. Kyseiset päästöluokat ovat luokitusjärjestelmien vähäpäästöisimpiä luokkia. Vähäpäästöinen materiaali ei haise, eikä merkittävästi lisää sisäilman epäpuhtauspitoisuutta materiaalin emissioilla, eli materiaalista sisäilmaan kulkeutuvilla kemiallisilla päästöillä.

Ilmatiiviiden parantamisessa käytettävien tuotteiden asennuspinta-alan osuus sisäpintojen kokonaispinta-alasta on hyvin pieni ja vaikutus sisäilman laatuun on kokonaisuus huomioiden vähäinen. Usein tuotteet asennetaan rakenteiden pintakerrosten alle, jolloin tuotteiden mahdolliset emissiot eivät ole suorassa yhteydessä sisäilmaan. Materiaalien

päästöluokitustarvetta tulee arvioida tapauskohtaisesti asennuslaajuus ja ilmayhteys sisäilmaan huomioiden.

### **Tarkastusväli / huoltoväli / kunnossapitajakso**

Korjaustasoissa käytettävälle materiaaleille on asetettu vaatimukseksi eriasteiset tarkastusvälit, huoltovälit tai kunnossapitajakset, jotka tulee huomioida materiaalivalinnoissa korjausten suunnittelussa ja rakennuksen ylläpidossa. Korjauksen suunnittelija määrittelee tarkastus-, huolto- tai kunnossapitotarpeen kohde- ja korjausmenetelmäkohtaisesti korjauksessa käytetyn korjaustason, ilmatiiviiden tavoitetason sekä korjauksessa käytettyjen materiaalien ominaisuudet ja pitkäaikaiskestävyys huomioiden.

**Tarkastusväli:** Tarkastusvälillä tarkoitetaan aikaväliä, jonka kuluttua tehdyn korjauksen kunto ja toimivuus on tarkastettava. Tarkastusvälien tulee olla sellaisia, että tarkastuskohde pysyy kunnossa tarkastusten välisen ajan.

**Huoltoväli:** Huoltovälillä tarkoitetaan aikaväliä, jonka kuluttua tehdyille korjaukselle tehdään työ- tai laadunvarmistusohjeen mukaiset, tarvittavat tarkastus- ja huoltotoimenpiteet.

**Kunnossapitajakso:** Kunnossapitajaksolla tarkoitetaan keskimääräistä aikaväliä, jonka jälkeen määrätty kunnossapitotoimenpide toistetaan työ- tai laadunvarmistusohjeen mukaisesti. Kunnossapito on tehdyn korjauksen käsittelemistä osittain uusimalla, täydentämällä, kunnostamalla tai pinnoittamalla.

### **Laadunvarmistus**

Laadunvarmistus toteutetaan korjaustasokohtaisesti korjattavalle rakenteelle asetetun ilmatiiviiden tavoitetason mukaisesti. Korjauksen suunnittelijan tulee sisällyttää suunnitelmiin riittävät korjaustyön dokumentointi- ja valvontavaatimukset sekä muut laadunvarmistustoimenpiteet.

**Tavanomainen:** Tavanomaisessa korjaustasossa laadunvarmistuksen suosituksena on RT-ohjekortin 14–11197 mukaisen ilmavuotokorjauksen ilmatiiviiden tavoitetaso 3. Kyseessä on tällöin ilmatiiviiden parantaminen, jolloin merkkiainetekniikalla tutkittuna ei saa olla merkittäviä vuotoja sisätilojen ollessa alipaineistettuna ja paine-eron ollessa vähintään 10 Pa sekä enintään vähäisiä vuotoja käyttötilanteessa sisätilojen ollessa alipaineisia ja paine-eron ollessa alle 5 Pa. Korjaustason laadunvarmistuksen vähimmäisvaatimuksena on vähintään aistinvaraisesti tarkastus suunnitellun korjauslaajuuden toteutukseksi sekä korjauksen riittävän ilmatiiviiden toteaminen esim. merkkisavua hyödyntäen.

**Vaativa:** Vaativassa korjaustasossa laadunvarmistuksen vaatimuksena on RT-ohjekortin 14–11197 mukaisen ilmavuotokorjauksen ilmatiiviiden tavoitetaso 2. Kyseessä on tällöin merkittävä ilmatiiviiden parantaminen, jolloin merkkiainetekniikalla

sallitaan vähäisiä vuotoja sisätilojen ollessa alipaineistettuna ja paine-eron ollessa vähintään 10 Pa. Merkkiainekokeilla tulee tarkastaa otantana vähintään 20 % tehdyistä asennuksista.

**Poikkeuksellisen vaativa:** Poikkeuksellisen vaativassa korjaustasossa laadunvarmistuksen vaatimuksena on RT-ohjekortin 14–11197 mukaisen ilmavuotokorjauksen ilmatiiviyden tavoitetaso 1. Kyseessä on tällöin täysin ilmatiivis korjaus, jolloin merkkiainetekniikalla tutkittuna vuotoja ei sallita alipaineistettuna RT-ohjekortin mukaisissa painesuhteissa. Merkkiainekokeilla tulee tarkastaa otantana vähintään 80 % tehdyistä asennuksista.

## Ilmanvaihdon ja painesuhteiden vaatimukset

Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D2 (2012) määrää kohdan 3.7.7. mukaan muun muassa, että rakennuksen painesuhteet suunnitellaan ja toteutetaan siten, että ne osaltaan vähentävät epäpuhtauksien siirtymistä rakennuksessa. Määräyksen mukaisesti ilmanvaihto tulee säätää järjestelmän sallimissa rajoissa minimoimaan sisätilojen alipaineisuuden mahdollistama vuotoilman vaikutus rakennuksessa. Korjaustasoissa esitetyt vaatimukset tulee täyttyä suoritettua korjaustyön jälkeen vähintään korjausalueella.

**Tavanomainen:** Tavanomaisessa korjaustasossa ilmanvaihdon toiminnan vähimmäisvaatimuksena ovat voimassa olevan Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 määräykset ja ohjeet.

**Vaativa ja poikkeuksellisen vaativa:** Vaativassa ja poikkeuksellisen vaativassa korjaustasossa ilmanvaihdon toiminnan vähimmäisvaatimuksena ovat pääosin voimassa olevan Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 määräykset ja ohjeet. Poiketen D2 ohjeista koskien rakennuksen alipaineisuutta, lisävaatimuksena korjaustasoissa korjatun rakenteen yli olevan paine-eron on oltava vähintään asumisterveysoppaan tavoitteellisia sisäilman ja ulkoilman välisiä paine-eroja vastaava korjauksen suunnittelijan ohjeistaman seurantajakson aikana seuraavan taulukon (Taulukko 1) mukaisesti.

**Taulukko 1.** Tavoitteelliset paine-erot korjatun rakenteen yli eri ilmanvaihtotavoilla.  
Lähde: Asumisterveysopas

Ilmanvaihtotapa	Paine-ero korjatun rakenteen yli	Huomautuksia
Painovoimainen ilmanvaihto	0...-5 Pa	Mittausjakson keskiarvo, paine-ero voi vaihdella hetkellisesti voimakkaasti
Koneellinen poistoilmanvaihto	-5...-20 Pa	Mittausjakson keskiarvo, paine-ero voi vaihdella

		hetkellisesti
Koneellinen tulo- ja pois-toilmanvaihto	0...-2 Pa	Mittausjakson keskiarvo, paine-ero voi vaihdella hetkellisesti ilmanvaihdon käyttöaikojen ja esim. tuulen mukaan

Vaativan ja poikkeuksellisen vaativan korjaustason paine-erojen tavoitearvot on mahdollista saavuttaa ilmanvaihtojärjestelmän säädöillä tai ulkoilmavirtaa tehostamalla.

Rakennuksen painesuhteiden tarkastelussa tulee huomioida riittävän pitkä mittausjakso, mittalaitteiden toimivuus ja mittaustarkkuus sekä mahdolliset mittausvirheet.

Mittaustulosten perusteella havaitut ilmanvaihdon ja painesuhteiden poikkeamat tulee korjata vähintään säätötyönä. Mikäli poikkeamat johtuvat virheellisistä tai puutteellisista ilmanvaihtosuunnitelmista, tulee suunnitelmia tarkentaa. Ilmanvaihdon ja painesuhteiden vaatimukset tulee varmentaa mittauksin säätötyön jälkeen.

## Suunnittelutaso

Suunnittelutasot jaetaan kolmeen eri tasoon, vähäiseen, tavanomaiseen ja vaativaan, joissa esitetään korjaustasoitain soveltuvat vähimmäissuositukset suunnitelmasisällöstä sekä suunnittelijan pätevyydestä. Kaikissa suunnittelutasoissa on korjausmenetelmien osalta noudatettava rakentamisen yleisiä laatuvaatimuksia ja korjauksessa käytettyjen materiaalien soveltuvuus- ja asennusohjeita.

**Vähäinen:** Vähäisessä suunnittelutasossa suunnitelmien tulee sisältää vähintään kohdekohtaisen työohjeen. Suunnittelijalla on oltava kohteen ja suunnittelutehtävän laatu ja laajuus huomioiden riittävä osaaminen.

**Tavanomainen:** Tavanomaisessa suunnittelutasossa suunnitelmien tulee sisältää vähintään kohdekohtaisen työohjeen, työpiirustukset sekä asennustyön laadunvarmistusohjeen. Suunnittelijalla on oltava kyseiseen suunnittelutehtävään soveltuva, rakentamisen tai tekniikan alalla suoritettu tutkinto, joka on vähintään teknikon tai vastaavan tutkinnon tasoinen, sekä vähintään kolmen vuoden kokemus avustavista suunnittelutehtävistä.

**Vaativa:** Vaativassa suunnittelutasossa suunnitelmien tulee sisältää vähintään kohdekohtaisen korjaussuunnitelman tarvittavine rakennesuunnitelmineen sekä korjaushankkeen laadunvarmistussuunnitelman, joka sisältää korjauksen laatutason säilymisen kannalta tarvittavat tarkastus-, huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet. Suunnittelijalla on oltava kyseiseen suunnittelutehtävään soveltuva, rakentamisen tai tekniikan alalla suoritettu korkeakoulututkinto, aiempi ammatillisen korkea-asteen tutkinto tai sitä vastaava tutkin-

to sekä vähintään neljän vuoden kokemus tavanomaisista suunnittelutehtävistä ja vähintään kahden vuoden kokemus avustamisesta vaativissa suunnittelutehtävissä.

### **Asentajan pätevyys**

Korjaustyössä vaadittava asentajan pätevyys jaetaan kolmeen eri tasoon, vähäiseen, tavanomaiseen ja vaativaan, joissa esitetään asennustyön vaatima osaaminen sekä perehtyneisyys käytettävään korjausmenetelmään.

**Tavanomainen:** Tavanomaisessa korjaustasossa korjaustyötä tekevällä asentajalla tulee olla käytynä vähintään materiaalitoimittajan koulutus käytettävään tiivistysmenetelmään tai vaihtoehtoisesti korjauksen suunnittelijan kanssa käyty työmaakatselmus korjauksen sisällöstä.

**Vaativa:** Vaativassa korjaustasossa suositellaan VTT:n Rakenteiden tiivistäjä – henkilösertifiointia vähintään työmaan vastuuhenkilölle. Vähimmäisvaatimuksena korjaustyötä tekevällä asentajalla tulee olla käytynä vähintään materiaalitoimittajan koulutus käytettävään tiivistysmenetelmään.

**Poikkeuksellisen vaativa:** Poikkeuksellisen vaativassa korjaustasossa vähintään työmaan vastuuhenkilöllä tulee olla voimassa oleva VTT:n Rakenteiden tiivistäjä – henkilösertifiointi.

### **Betonirakenteiden ilmatiiviiden tavoitetason määrittäminen korjaustasojen avulla**

Diplomityössä määritellyssä korjaustasojen määritysohjeessa ilmatiiviiden tavoitetasot on asetettu eriasteisiksi korjaustasoiksi, joissa esitetään ilmatiiviiden parantamiseen liittyvien korjauksien tavoitteelliset, toiminnalliset ja laadulliset kriteerit. Korjaustasoiksi on määritelty tavanomainen, vaativa ja poikkeuksellisen vaativa korjaustaso. Korjaustason valinta perustuu riskiarviointimenettelyyn, jonka perusteella korjaustyössä huomioidaan ne tekniset ja laadulliset menetelmät, joita valittu korjaustaso edellyttää.

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 2) on esitetty betonirakenteiden ilmatiiviiden tavoitetason määrittäminen eriasteisilla korjaustasoilla.

**Taulukko 2.** Taulukossa esitetään betonirakenteiden ilmatiiviynen tavoitetaso määrittäminen eriasteisilla korjaustasoilla.

Kriteerit	Korjaustaso		
	Tavanomainen	Vaativa	Poikkeuksellisen vaativa
<b>Sisäilman laatu</b>	Sisäilmakysely suosituk-sena  Tarvittavat tutkimukset tehty  Sisäilmaongelmaa ei ole (Todettu vuotoilmareitti sisäilmaan)	Sisäilmakysely suosituk-sena  Tarvittavat tutkimukset tehty  Sisäilmaongelma rajatul-la alueella  (Todettu haitallisia epäpuhtauksia rakenteissa ja vuotoilmareitti sisäilmaan)	Sisäilmakysely suositukse-na  Tarvittavat tutkimukset tehty  Merkittävä sisäilmaongel-ma rakennuksessa  (Todettu merkittäviä hai-tallisia epäpuhtauspitoi-suuksia rakenteissa ja sisäilmassa sekä vuotoil-mareitti sisäilmaan)
<b>Materiaalipäästöt</b>	Suositus M1 / EC1+	Suositus M1 / EC1+	Suositus M1 / EC1+
<b>Tarkastusväli / huoltoväli / kun-nossapitojakso</b>	1...3 vuotta	3...10 vuotta	>10 vuotta
<b>Laadunvarmistus</b>	Suositus: RT 14–11197 Merkkiainetutkimus: Taso 3  Vähintään aistinvaraises-ti esim. merkkisavua hyödyntäen	RT 14–11197 Merk-kiainetutkimus: Taso 2  Merkkiainekokeilla tarkastetaan otantana 20...30 % tehdyistä asennuksista	RT 14–11197 Merk-kiainetutkimus: Taso 1  Merkkiainekokeilla tarkas-tetaan otantana 80...100 % tehdyistä asennuksista
<b>Ilmanvaihdon ja painesuhteiden vaatimukset</b>	Vähintään voimassaole-van D2 mukainen	Vähintään voimassaole-van D2 mukainen  Täyttää asumisterveys-oppaan tavoitteelliset paine-erot	Vähintään voimassaolevan D2 mukainen  Täyttää asumisterveysop-paan tavoitteelliset paine-erot
<b>Suunnittelutaso</b>	Vähäinen	Tavanomainen	Vaativa
<b>Asentajan pätevyys</b>	Vähintään materiaalitoi-mittajan koulutus käytet-tävään tiivistysmenetel-mään tai työmaakatsel-mus suunnittelijan kanssa	Suosittelaa VTT-sertifikaattia, vähintään materiaalitoimittajan koulutus käytettävään tiivistysmenetelmään	VTT-sertifikaatti vähintään työmaan vastuuhenkilöllä